Reinhard Breuer
Chefredakteur

Warum macht Terrorismus Angst?

Es gehört schon fast zur Tradition dieses Magazins, dass wir Themen wie Rüstungskontrolle, Kriegsforschung, ABC-Waffen oder Terrorismus Platz einräumen (zuletzt im Heft 12/02, S. 72, »Hightech gegen Bioterror«). Der Artikel über »schmutzige Bomben« auf Seite 28 widmet sich der aktuellen Gefahr des Nuklearterrorismus. Das Brisante dieser Art von Terrorwaffen liegt darin, dass sie wesentlich einfacher herzustellen und leichter zu transportieren sind als Atombomben. Stadtteile oder sogar ganze Städte ließen sich so mit relativ geringem Aufwand unbewohnbar machen.

Doch ein Terrorist will natürlich nicht einfach nur zerstören, sondern terrorisieren, also Angst auslösen. Voraussetzung dieses scheinbar banalen Effekts ist ein komplexer Feedback-Mechanismus: Die Medien und ihre globale Verstärkungswirkung sind dazu ebenso unerlässlich wie unsere allgemeine Neigung zur Panik. Zwei Vorfälle zu Jahresbeginn zeigten es wieder. Im Januar umkreiste ein verwirrter Sportflieger eine Weile die Bankenhochhäuser Frankfurts und legte für Stunden Teile der Innenstadt sowie den Flughafen lahm – CNN ging auf Liveschaltung. Wenige Tage später: In London werden sechs Nordafrikaner verhaftet und in einer kleinen Dachwohnung Spuren des tödlichen Pflanzengiftes Rizin gefunden. Solche Meldungen gemahnen unweigerlich an den 11. September und danach (Frankfurt als »Mainhattan«, Rizin als Nachfolger von Anthrax); sie veranlassen die Kommentatoren, von konkreter terroristischer Bedrohung in einem Atemzug mit einem möglichen Irak-Krieg zu sprechen.

Die spontane Furcht, die uns vor konkreten Gefahren rechtzeitig flüchten lässt und damit das Überleben sichert, ist längst einer latenten Dauerfurcht gewichen. »Man lebt in ständiger Angstbereitschaft. Und das so sehr, dass sie zum Betriebsstoff der Massenmedien werden kann«, bemerkte der Schriftsteller Dietrich Schwanitz kürzlich im »NZZ Folio«. Die Kampfmittel der Medien seien permanente »Dramatisierung« und »Konfliktverschärfung«, die sich zwanglos mit globalen Katastrophenszenarien verbänden. Eine permanente »Ausrufung des Ausnahmezustands« sei die Folge, ja ein »Katastrophenvirtuosentum«.

»Was man versteht, mag man fürchten. Aber es macht keine Angst mehr«

Und wir, zugleich Opfer und Mittäter dieser Grundstimmung, schlagen täglich die Zeitung auf und suchen regelrecht nach Bestätigung unserer Katastrophenerwartung. Je länger dieses Verhalten kollektiv eingeübt wird, desto mehr tragen insbesondere wir Journalisten zur Angstwirkung terroristischer Aktionen bei.

Es ist auch für eine populärwissenschaftliche Zeitschrift wie »Spektrum« schwer, aus diesem Teufelskreis auszusteigen. Unsere Chance sehen wir darin, dass Sie von uns nicht noch mehr Katastrophenmeldungen erwarten, sondern die wissenschaftlich-technischen Hintergründe drohender Gefahren verstehen möchten – weshalb wir auch weiterhin über diese Themen berichten werden.

Was man versteht, mag man fürchten. Aber es macht keine Angst mehr.

INHALT

FORSCHUNG AKTUELL

8 **Nach dem Rave kommt das Zittern**
Bei Affen erzeugt Ecstasy Hirnschäden ähnlich denen von Parkinson-Patienten

10 **Gummi mit beschränkter Haftung**
Ein fraktales Modell für die Griffigkeit von Autoreifen erspart teure Tests

11 **Mit Bakterien gegen faule Zähne**
Trickreicher Schutz vor Karies

12 **Ein Netz guter Beziehungen**
Mathematiker erfassen die soziale Struktur unserer »Kleinen Welt«

15 **Das neue Einmaleins von Wasserstoff und Sauerstoff**
Ein flüchtiger Vetter des Wassers erweist sich als verkanntes Talent

16 **Nachgehakt**
Bald »Beute« von Computer-Schwärmen?

21 **Bild des Monats**
Vielarmiger Dosenöffner

SPEKTROGRAMM

36 Urvogel mit vier Flügeln · Das Meer als Magnet · Tirolerhut aus der Bronzezeit · Luftig-locker-leichter Lärmschlucker u. a.

THEMEN

22 **25 Jahre Spektrum der Wissenschaft Teil III: Gehirnforschung**
Der Weg zum Bewusstsein

28 **Schmutzige Bomben als Terrorwaffe**
Anschläge mit radiologischen Waffen sind eine ernst zu nehmende Bedrohung

38 **TITELTHEMA: Der Ursprung lag in Afrika**
Die Evolution des modernen Menschen

48 **Gammablitze im All**
Astronomen enträtseln die stärksten Energieausbrüche im All

58 **Fragwürdige Ernährungsratschläge**
Die offiziellen Empfehlungen zur gesunden Ernährung sind irreführend bis falsch

70 **Chaos in der Quantenwelt**
Auch Atome und Moleküle zeigen chaotisches Verhalten

78 **Technologie-Report: Musiktechnik**
Der Computer mausert sich zum universalen Werkzeug in der Musikproduktion

Titelbild: Die Neandertaler-Skulptur der Mannheimer Ausstellung »MenschenZeit« rekonstruierten W. Schnaubelt und N. Kieser, Wildlife Art.

Bild: J. Christen, Reiss-Engelhorn-Museen Mannheim

SEITE 22

SERIE »25 JAHRE SPEKTRUM« (III)

Die Revolution der Neurowissenschaften

Die Gehirnforschung erschließt den Kosmos in uns, vom Innenleben einzelner Nervenzellen bis zu ihrem Zusammenspiel. Heute beobachten Experten das Denkorgan bei der Arbeit.

SEITE 28

NUKLEAR-TERRORISMUS

Schmutzige Bomben als Terrorwaffe

Radioaktiver Staub treibt durch die Stadt, Menschen fliehen in Panik, kostspielige Säuberungen sind notwendig, Krebserkrankungen steigen an – ein solches Szenario könnte Wirklichkeit werden, wenn Terroristen Anschläge mit radiologischen Waffen verüben.

SEITE 48

ASTROPHYSIK

Die stärksten Explosionen im Universum

Seit Jahrzehnten rätseln Astronomen über Ausbrüche höchster Strahlungsenergie im Universum. Erst seit kurzem beginnen sie, das Geheimnis dieser so genannten Gamma Ray Bursts zu lüften. Vermutlich entsteht bei jedem dieser Ereignisse ein Schwarzes Loch.

SEITE 58

ESSEN UND TRINKEN

Macht gesunde Ernährung krank?

Die seit einem Jahrzehnt geltenden offiziellen Ernährungsempfehlungen haben sich als irreführend erwiesen. So sind manche der verteufelten Fette gesund, viele hochgelobte Kohlenhydrate dagegen nicht.

TITELTHEMA: EVOLUTION

SEITE 38

Der Ursprung lag in Afrika

Zwar könnte auch etwas Erbgut der Neandertaler in uns schlummern. Doch von ihnen stammt der anatomisch moderne Mensch nicht ab. Die Fakten belegen immer klarer seinen afrikanischen Ursprung.

SEITE 70

PHYSIK

Chaos in der Quantenwelt

Nicht nur Planetensysteme oder tropfende Wasserhähne zeigen chaotisches Verhalten: Sie reagieren unabsehbar heftig auf winzige Änderungen der Anfangsbedingungen. Auch in der Quantenwelt tritt Chaos auf – mit wichtigen Konsequenzen für nanotechnische Anwendungen.

TECHNOLOGIE-REPORT

SEITE 78

Musik digital

Die Compactdisc markierte den Beginn einer Revolution: Aus analogem Schall wurden Bits und Bytes. Rasch eroberten digitale Systeme auch die Produktionsstudios. Heute steht der nächste Schritt an: Der Computer mausert sich zum Universalwerkzeug.

FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

90 Der Aufbruch der frühen Menschen
Die Reiss-Engelhorn-Museen Mannheim zeigen die Ausstellung »MenschenZeit«

92 Vorbereitung mit Vernunft
Wie sich Deutschland gegen Anschläge mit Biowaffen wappnet

95 Känguru der Mathematik
Ein Wettbewerb für Schüler gewinnt immer mehr Zulauf

96 Kommentar
Abgestürzt – die Columbia-Katastrophe

REZENSIONEN

98 Der Brockhaus – Naturwissenschaft und Technik von Brockhaus-Redaktion
Tiere von David Burnie (Hg.)
Die Macht der Seuchen von Claudia Eberhard-Metzger und Renate Ries
Drosophila von Martin Brookes
Die H_2-Revolution von Jeremy Rifkin
Geschichte der Hirnforschung von Erhard Oeser

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

110 Springmeister im Zahlenreich

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial
6 Leserbriefe
7 Impressum
56 Im Rückblick
68 Wissenschaft im Alltag
Tintenstrahldrucker
76 Wissenschaft in Unternehmen
109 Wissenschaft im Internet
112 Preisrätsel
114 Stellenmarkt
Lehre und Forschung
118 Vorschau

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN

Bauanleitung für eine Zeitmaschine

Ein Fahrzeug für Zeitreisen wäre gewiss nicht einfach zu konstruieren – aber zumindest theoretisch ist es denkbar.

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE
NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Die Identität der Quanten

Januar 2003

Nichts wirklich Neues

Was Peter Pesic in seinem Artikel beschreibt, ist keine wirklich neue Deutung der Quantenphysik. Ein Atom, das durch einen Doppelspalt fliegt, zeigt Interferenz, solange die beiden klassisch möglichen Wege durch die Spaltöffnungen ununterscheidbar sind. Prägt man dem Atom an einer der Spaltöffnungen eine »Welcher-Weg-Information« auf, etwa durch Anregung eines inneren Zustands, so sind die Möglichkeiten prinzipiell unterscheidbar, und man beobachtet keine Interferenz mehr. Insofern wird in dem Artikel die Nichtunterscheidbarkeit der Möglichkeiten lediglich anders interpretiert, nämlich als Nichtunterscheidbarkeit der Quanten selbst.

Etwas wirklich Neues oder Weiterführendes in der spannenden Frage nach der Deutung der Quantentheorie kann ich darin nicht erkennen.

Wolf-Peter Hirlinger, Heidenheim

Begrifflicher Unsinn

Peter Pesic versucht die Rätsel der Quantenwelt auf die Ununterscheidbarkeit der »Mikropartikel« zurückzuführen. Doch wird begrifflicher Unsinn getrieben, wenn behauptet wird, ein zusammengesetztes Objekt wie ein Xenon-Atom auf einer Materialoberfläche sei in jeder Hinsicht identisch mit allen anderen Xenon-Atomen. Eine solche Annahme ist letztlich zu vergleichen mit der Aussage, eine auf einem Teller liegende flach gepresste Tomate sei absolut identisch mit allen anderen Tomaten in dieser Welt. Veranschaulichung darf nicht auf Kosten der Richtigkeit gehen, und ebenso sollte Vereinfachung nicht eine Hintertür für inkonsistente Konzepte auftun.

Dr. Andreas Aste, Basel

Anmerkung der Redaktion:

In Heft 1/2003 fehlte der Hinweis, dass dieser Artikel zuvor bei American Scientist Magazine erschien (siehe auch www.americanscientist.org).

Die Rätsel der Quantenwelt erklärt Peter Pesic damit, dass Mikropartikel vollkommen identisch und ununterscheidbar sind.

MICHAEL FREEMAN / CORBIS

Der *Homo oeconomicus* auf dem Prüfstand

Forschung aktuell, Dezember 2002

Stückzahlen und Stückkosten

Der Verlauf der roten Verkäuferkosten-Treppenkurve im linken Diagramm im Kasten auf Seite 24 ist falsch. Für eine steigende Anzahl verkäuflicher Einheiten müssen die Kosten pro Apfel auch für den Verkäufer sinken und nicht steigen. Denn je mehr Stücke von einer Ware produziert werden, desto geringer ist der Selbstkostenpreis der Ware pro Stück, da große Stückzahlen stets rationeller produzierbar sind als geringe.

Andreas Meissner, Berlin

Antwort des Autors:

Auf dem fiktiven Apfelmarkt von Vernon L. Smith hat jeder Verkäufer nur einen Apfel überhaupt anzubieten. Es ist der Ökonom, der die Verkäufer nach steigenden Reservationspreisen sortiert.

Das heißt, die rote Kurve gibt zu jeder Menge von Äpfeln an, welchen Stückpreis ein potenzieller Käufer für die Menge zu zahlen bereit sein müsste (zumindest für den letzten Apfel).

Alternative Betrachtungsweise: Man sehe, im Gegensatz zur üblichen Lesart, den Preis (der auf der y-Achse abgetragen ist) als die unabhängige Variable an und die Menge als die abhängige. Zu einem Preis p (abzulesen auf der y-Achse) gibt es so viele Verkäufer (man gehe bis zur roten Kurve und dann abwärts), die zu diesem Preis zu verkaufen bereit sind; entsprechend für die Käuferkurve.

Christoph Pöppe

Neues Design

Januar 2003

Aus einem Guss

Alles Gute zum neuen Heft! Sehr elegant die neuen Leitfarben Grau und Ocker. Den Themenkasten rechts oben auf der Titelseite finde ich besser als die bisherige Leiste. Das ganze Heft erscheint noch mehr aus einem Guss – herzlichen Glückwunsch!

Martin Meister, Hamburg

Glückwünsche zur endgültigen Version

Nach den kleineren Änderungen in der Vergangenheit hatte ich mich schon gefragt, wann die endgültige Version kommt. Zu der jetzigen Neugestaltung möchte ich Ihnen meine Glückwünsche aussprechen; sie zeigt einen eigenen Charakter, ohne dabei vom Inhalt abzulenken. Die Verwendung der Univers statt der durch das eigenwillige »e« etwas unruhigen Rotis ist in meinen Augen eine ebenso gute Wahl wie die Adobe Garamond statt der schon etwas verbrauchten Times. Mit Freude habe ich ebenfalls gesehen, dass Sie nun auch die entsprechenden Ligaturen verwenden, was heutzutage zu den eher seltenen Qualitäten zählt.

Dipl.-Ing. Marc Schneider, Darmstadt

Fortschritt in die falsche Richtung

Die Umgestaltung der Zeitschrift missfällt mir. Die Schrift ist deutlich schlechter lesbar, vor allem bei nicht idealer Beleuchtung. Das klebegebundene Heft öffnet sich erheblich gewölbter als das geheftete. Meine Beurteilung insgesamt: Es ist ein Fortschritt in die falsche Richtung.

Otto Mayrhofer, Karlsfeld

Wenn Sterne zusammenprallen

Januar 2003

Hinweis der Redaktion:

Mehrere Leser haben uns darauf aufmerksam gemacht, dass die beiden im Artikel genannten Links zu Filmen simulierter Sternkollisionen Probleme bereiten.

Wenn der Film »Weißer Zwerg trifft Roten Riesen« nicht direkt unter www.ukaff.ac.uk/movies/collision.mov aufzurufen geht, gehen Sie bitte auf die Seite www.ukaff.ac.uk und klicken Sie den Link »Movies & pictures« an. Blättern nach unten zeigt Ihnen unter der Überschrift »A stellar collision« die gesuchten Links des Films. Hier können Sie zwischen verschiedenen Dateiformaten und -größen wählen.

Den Film »Hauptreihenstern trifft Hauptreihenstern« können Sie in verschiedenen Versionen direkt aufrufen: http://www.ifa.hawaii.edu/~barnes/research/stellar_collisions/index.html

Notfallmedizin

Technoskop-Spezial, Januar 2003

Das Notfall-Räderwerk

Dass die Bahre im korrekten Sprachgebrauch nur zur Aufbahrung von Toten dient, zur Rettung und zum Transport von Verletzten hingegen die Trage zum Einsatz kommt, ist zugegebenermaßen eher von terminologischer Bedeutung.

Die im ersten Teil des Artikels beschriebenen Tätigkeiten zur initialen Beurteilung und ersten Stabilisierung des Patienten würden aber in der Realität trotz »kurzer Kommandos des Arztes« nicht »routiniert nebeneinander ablaufen«, wenn dieser mit Sanitätern ausrücken würde. Letztere benötigen gerade mal vierzig Stunden Ausbildung, während der Rettungsassistent drei Jahre Ausbildung und eine Staatsprüfung vorzuweisen hat und bei Abwesenheit eines Arztes weitreichende ärztliche Kompetenzen besitzt.

Dimitrios Michalos,
Rettungsleitstelle Norderstedt

RETTUNGSDIENST INTERMEDIC, SCHWEIZ

Lebensbedrohliche Vielfachverletzungen erfordern eine minutiöse Koordination der beteiligten Helfer.

Was steuert uns, wenn wir am Steuer sitzen?

Ist es vielleicht paradoxerweise der Fahrkomfort moderner Kraftfahrzeuge, der zu den oft unbegreiflichen Unfällen auf gerader Strecke oder in übersichtlichen Kurven führt? – Mein erstes Auto, ein kleiner Lloyd, schaffte mit Mühe hundert Stundenkilometer. Dann zitterte das Lenkrad, und auch der Fahrer zitterte um Leib und Leben, weil das Auto so raste. Ein moderner Wagen gleitet bei gleichem Tempo sanft dahin, die Servolenkung lässt die an den Rädern zerrenden Kräfte nicht spüren, und was der Fahrer versiebt, biegt die Elektronik wieder zurecht, – denkt mancher, und das ist oft sein letzter Gedanke.

Ein anderer Faktor, bisher kaum untersucht, ist die überlaute Musik, die mehr ist als eine Modetorheit. Wohl ärgert sich der unfreiwillige Zuhörer über die rücksichtslosen Autofahrer, die im Sommer ihren Musikmüll aus dem offenen Fenster entsorgen, aber für den Fahrer selbst dürften die Folgen schlimmer sein. Im engen Käfig zugedröhnt, verfällt er in Trance und steuert ins Verderben. Auch ein lohnendes Thema für die Unfallforschung.

Hans Reinhard Rapp, Hermannsburg

Erratum

Editorial, November 2002

Die angegebene Homepage findet man nicht unter www.1000worte.de, sondern unter www.1000worte.com.

Die Redaktion

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (06221) 91 26 -729

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle, Christina Peiberg
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Natalie Schäfer, Andreas Merkert (stv. Hersteller)
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. (06221) 91 26-711, Fax (06221) 91 26-729
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (02244) 43 03, Fax (02244) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (0211) 908 3357, Fax (0211) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (06221) 91 26-770
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. (06221) 91 26-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. (06221) 91 26-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. (06221) 91 26-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Hermann Englert, Daniel Fischer, Dr. Markus Fischer, Marianne Kolter, Dr. Michael Springer.

Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. (06221) 91 26-600, Fax (06221) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Tel. (06221) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, D-69469 Weinheim, Tel. (06201) 60 61 50, Fax (06201) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Sibylle Roth, Tel. (0211) 887-23 79, Fax (0211) 887-23 99; verantwortlich für Anzeigen: Stefan Söht, Postfach 10 26 63, D-40017 Düsseldorf, Tel. (0211) 887-23 86, Fax (0211) 887-28 46
Anzeigenvertretung: Berlin: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, D-10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (030) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Burchardstraße 17, D-20095 Hamburg, Tel. (040) 30 18 31 94, Fax (040) 33 90 90; Düsseldorf: Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, D-40017 Düsseldorf, Tel. (0211) 3 01 35-20 60, Fax (0211) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Holger Schlitter, Eschersheimer Landstraße 50–54, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. (069) 24 24-45 34, Fax (069) 24 24-45 55; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, D-70173 Stuttgart, Tel. (07 11) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Reinold Kassel, Bernd Swetje, Josephspitalstraße 15, D-80331 München, Tel. (089) 54 59 07-12, Fax (089) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. (0211) 887-23 87, Fax (0211) 37 49 55
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 24 vom 01.01.2003.

Gesamtherstellung:
Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen
© Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, D-69038 Heidelberg.
Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder in eine von Datenverarbeitungsmaschinen verwendbare Form oder Sprache übertragen oder übersetzt werden. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.
ISSN 0170-2971

Ein Teil unserer Auflage enthält Beilagen von Rothacker, Martinsried; Gruner&Jahr, Hamburg; Weltbild Verlag, Augsburg; und Die Zeit, Hamburg. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

ECSTASY-MISSBRAUCH

Nach dem Rave kommt der Hirnschaden

In Tierversuchen kann die Droge Ecstasy schon bei einmaligem Gebrauch bleibende Hirnschäden hervorrufen. Zu den Spätfolgen zählen auch parkinsonähnliche Symptome. Werden die heutigen Raver im Alter zu einer »Zitter«-Generation?

Von Karin Schumacher

Ein paar bunte Pillen, in einer Partynacht eingeworfen, sind einfach hip. Sie heben die Stimmung, mindern die Distanz zu anderen Menschen und täuschen über das Schlafbedürfnis hinweg. So lassen sich Feste feiern, die durchaus mehrere Tage dauern können. Auch der Kontakt zum Traumtypen oder zur Traumfrau wird ohne Hemmungen möglich, und tanzen lässt sich in Dimensionen, für die sonst die Kondition eines Marathonläufers nach hartem Training nötig wäre.

Doch auch hier gilt offenbar das Schillerwort: Der Wahn ist kurz, die Reu ist lang. So harmlos, wie die Konsumenten glauben, ist die Designerdroge Ecstasy mit dem Hauptinhaltsstoff MDMA (3,4-Methylen-dioxy-methamphetamin) nämlich nicht. Schon länger besteht der Verdacht, dass ihr regelmäßiger Konsum bestimmte Zellen im Gehirn abtötet und damit den Kreislauf des Neurotransmitters Serotonin stört. Dieser Botenstoff ist für die Steuerung unseres Gemütslebens, des Schlafrhythmus und des Sexualtriebes zuständig.

Schon 1999 gab es außerdem einen ersten Hinweis, dass Ecstasy auch andere Neuronen schädigen könnte. Damals sorgte ein 29-jähriger Drogenkonsument mit parkinsonartigen Symptomen für Schlagzeilen. Die Parkinson-Erkrankung tritt meist erst im Alter auf und ist gekennzeichnet durch Koordinationsstörungen wie Starrheit in den Gliedern, Zittern und bis zur Unbeweglichkeit reichende Haltungsschäden. In einem Brief an die Fachzeitschrift »New England Journal of Medicine« vermuteten zwei der Ärzte, die den 29-Jährigen behandelten, einen Zusammenhang mit der Einnahme von Ecstasy. Allerdings blieb bei diesem Einzelfall unklar, welche Drogen tatsächlich konsumiert worden waren.

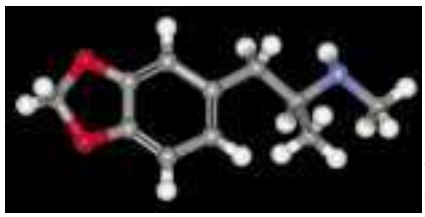
Auch Verunreinigungen in Rauschmitteln mit oft nur ungenau bekannter Zusammensetzung, die auf der Straße gehandelt werden, sind nämlich toxisch. Besonders die Substanz MPTP (1-Methyl-4-phenyl-1,2,3,5,6-tetrahydroperidin), die als hochgiftige Verunreinigung in Designerdrogen vom Pethidin-Typ vorkommt, kann parkinsonähnliche Schäden auslösen. Sie zerstört vornehmlich Nervenzellen, die in den Basalkernen des Großhirns für die Kontrolle von Bewegungen zuständig sind. Im Falle des 1999 erkrankten Junkies schrieb die Mehrheit der Mediziner deshalb die Symptome einer unbeabsichtigten Aufnahme von MPTP zu, das chemisch nicht mit dem MDMA von Ecstasy verwandt ist.

Nun aber hat ein Team um Una McCann und George Ricaurte an der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland) an Pavianen und Totenkopfäffchen gezeigt, dass MDMA tatsächlich auch Nervenzellen in den Basalkernen des Großhirns angreift *(Science, Bd. 297, S. 2260)*. Die Forscher spritzten den Affen drei übliche Dosen der Droge im Abstand von jeweils drei Stunden unter die Haut, um so eine typische Ecstasy-Nacht zu simulieren. Einige Zeit später maßen sie die Gehirnaktivität der Tiere.

Dabei erlebten sie eine Überraschung: Das Ecstasy hatte nicht nur Serotonin-Neuronen geschädigt, sondern auch Nervenzellen zerstört, die Dopamin als Neurotransmitter verwenden. Dieser Botenstoff ist an der Bewegungskontrolle beteiligt und wird bei Parkinson-Patienten in zu geringem Maße gebildet. Zum Entsetzen der Forscher waren die Dopamin-Neuronen in bestimmten Gehirnregionen sogar noch viel stärker dezimiert als die Serotonin-Nervenzellen. Das galt besonders für den so ge-

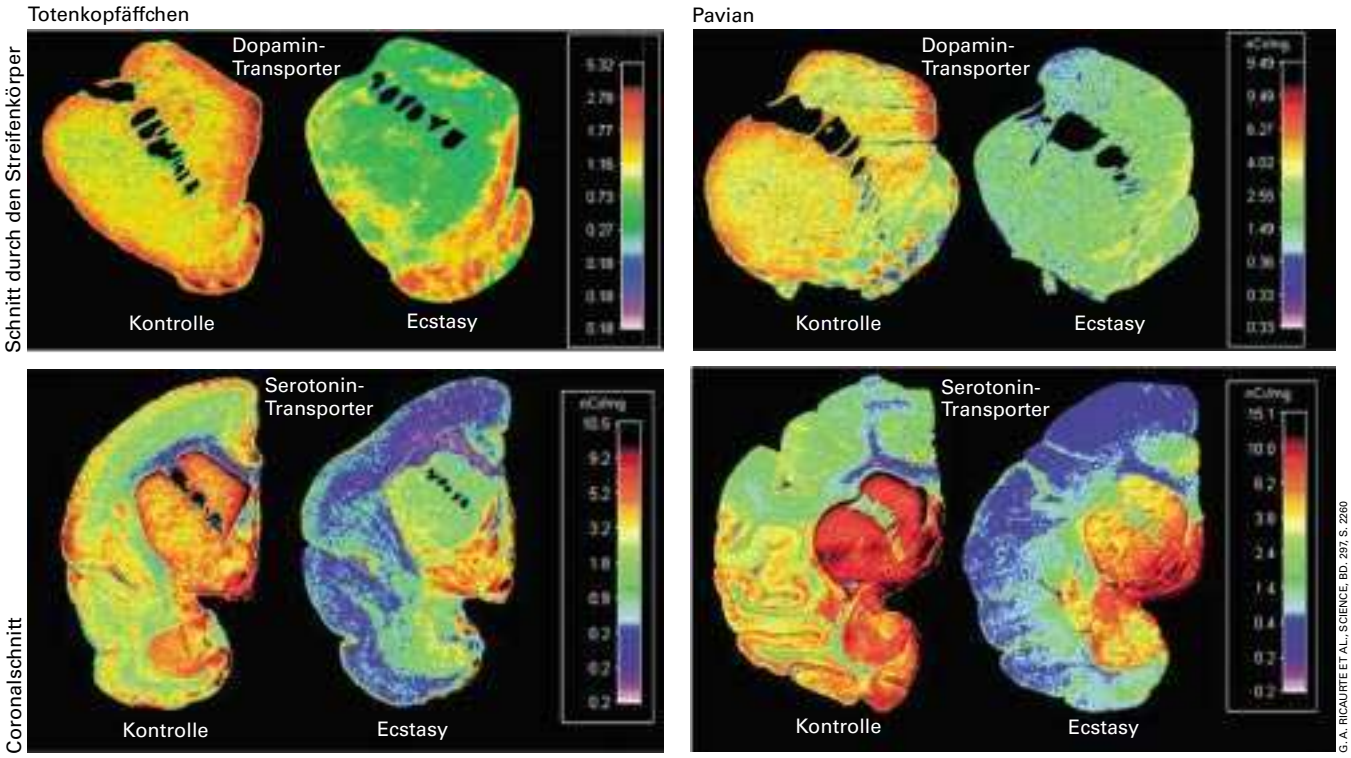
CORBIS

Zum Rave gehören häufig Ecstasy-Pillen (ganz unten) mit dem Hauptinhaltsstoff MDMA (unten).



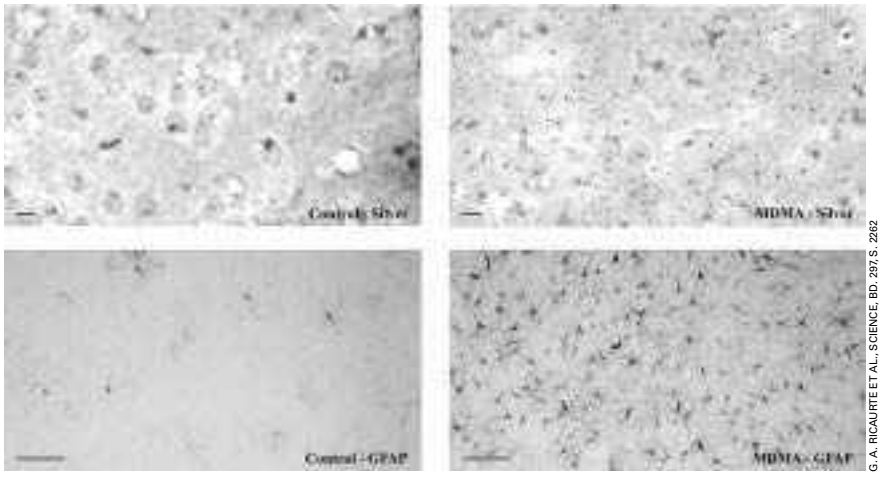
EROWID.ORG

EROWID.ORG



G. A. RICAURTE ET AL., SCIENCE, BD. 297, S. 2260

Im Gehirn von Totenkopfäffchen (links) und Pavianen (rechts) war zwei Wochen nach Gabe von Ecstasy die Konzentration von Dopamin-Transportern (oben) und von Serotonin-Transportern (unten) stark zurückgegangen.



G. A. RICAURTE ET AL., SCIENCE, BD. 297, S. 2262

Im Basalkörper eines mit Ecstasy behandelten Affen (rechts) sind im Vergleich zu einem Kontrolltier (links) die Nervenfasern degeneriert (Silberfärbung; oben) und durch Stützzellen ersetzt worden (Fluoreszenzmarkierung; unten).

nannten Streifenkörper *(Corpus striatum)*: ein Gebiet in der Basis jeder Großhirnhälfte, dessen Beeinträchtigung Bewegungsstörungen in Form von Lähmungen und Zittern hervorrufen kann. Hier waren teils mehr als 75 Prozent der Nervenzellen zerstört. Besonders beunruhigend ist, dass die Schädigung des Dopamin-Systems im Alter zu Symptomen führen kann, die denen der Parkinson-Krankheit ähneln.

Bislang zeigen die heutigen – überwiegend jugendlichen – Ecstasy-Konsumenten noch keine bleibenden Koordinationsschwierigkeiten. Aber wie wird das im Alter sein? Wiederholt sich in größerem Maßstab vielleicht ein Schreckensszenario, das die US-amerikanische Regisseurin Penny Marshall in ihrem Kinofilm »Zeit des Erwachens« ins Bild setzte? Im Verlauf einer Epidemie der »europäischen Schlafkrankheit«, die kurz nach dem Ersten Weltkrieg auftrat und noch weitgehend unklare Ursachen hatte, erkrankte eine ganze Generation von US-Bürgern an Gehirnentzündungen und entwickelte daraufhin ein parkinsonähnliches Krankheitsbild. Als sich Anfang der 1960er Jahre zeigte, dass die Symptome auf einem Mangel an Dopamin beruhen, der durch Verabreichung des Vorläufermoleküls L-Dopa vorübergehend ausgeglichen werden kann, ließen sich die Patienten für eine gewisse Zeit aus ihrem Dämmerzustand herausholen. Der Film, der auf einem Buch des Psychiaters Oliver Sacks beruht, führt eindringlich vor, wie sie allmählich wieder in die Erstarrung zurückfallen, als das Medikament seine Wirkung verliert.

Wird es der Raver-Generation ähnlich ergehen? Nach den Ergebnissen der Tierversuche könnte schon eine einzige, unter starkem Ecstasy-Einfluss durchtanzte Nacht das Hirn dauerhaft schädigen. In großen, multizentrisch angelegten Studien wird nun zu prüfen sein, ob die Ergebnisse des Tierversuchs auch für den Menschen gelten. Nach medizinischen Erkenntnissen sinkt der Dopamingehalt im Gehirn unweigerlich mit dem Alter. Dann könnte eine Vorschädigung durch Ecstasy in der Jugend den Spiegel des wichtigen Botenstoffs irgendwann unter die kritische Schwelle sinken lassen. ◁

Karin Schumacher ist promovierte Immunologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Berlin.

MATERIALFORSCHUNG

Gummi mit beschränkter Haftung

Geckos können es perfekt, Autoreifen schon ziemlich gut: Ein neues Modell erklärt ihre Haftung auf hartem Grund.

Von Roland Wengenmayr

Die mechanische Physik sollte heutzutage kaum noch Überraschungen zu bieten haben, und doch ließ sich bis vor kurzem eine Frage nur sehr unbefriedigend beantworten: Wie haftet weiches Material auf hartem, Reifengummi auf Asphalt, ein Gecko auf einer senkrechten Glasscheibe? Der Physiker Bo Persson vom Institut für Festkörperforschung am Forschungszentrum Jülich hat nun eine Theorie vorgestellt, die beispielsweise die Haftfähigkeit von Reifengummi genauer als bisherige Modelle vorhersagen kann. Entsprechend rege ist das Interesse der Industrie.

Denn deren Entwickler stehen vor einem Problem: Jede neue Gummimischung muss die Reifen noch griffiger machen, zugleich sollen sie weniger verschleißen und mehr Sprit einsparen als bisher. Griffigkeit erfordert aber aller Erfahrung nach einen weichen Gummi, geringer Verschleiß und wenig Spritverbrauch hingegen einen stabilen. Um diese einander widersprechenden Forderungen unter einen Hut zu bringen, stellen die Industrieforscher jeweils einen kompletten Reifen aus einer Testmischung her, erproben ihn und verändern dann die Rezeptur für den nächsten Versuch – eine sehr aufwendige und teure Methode.

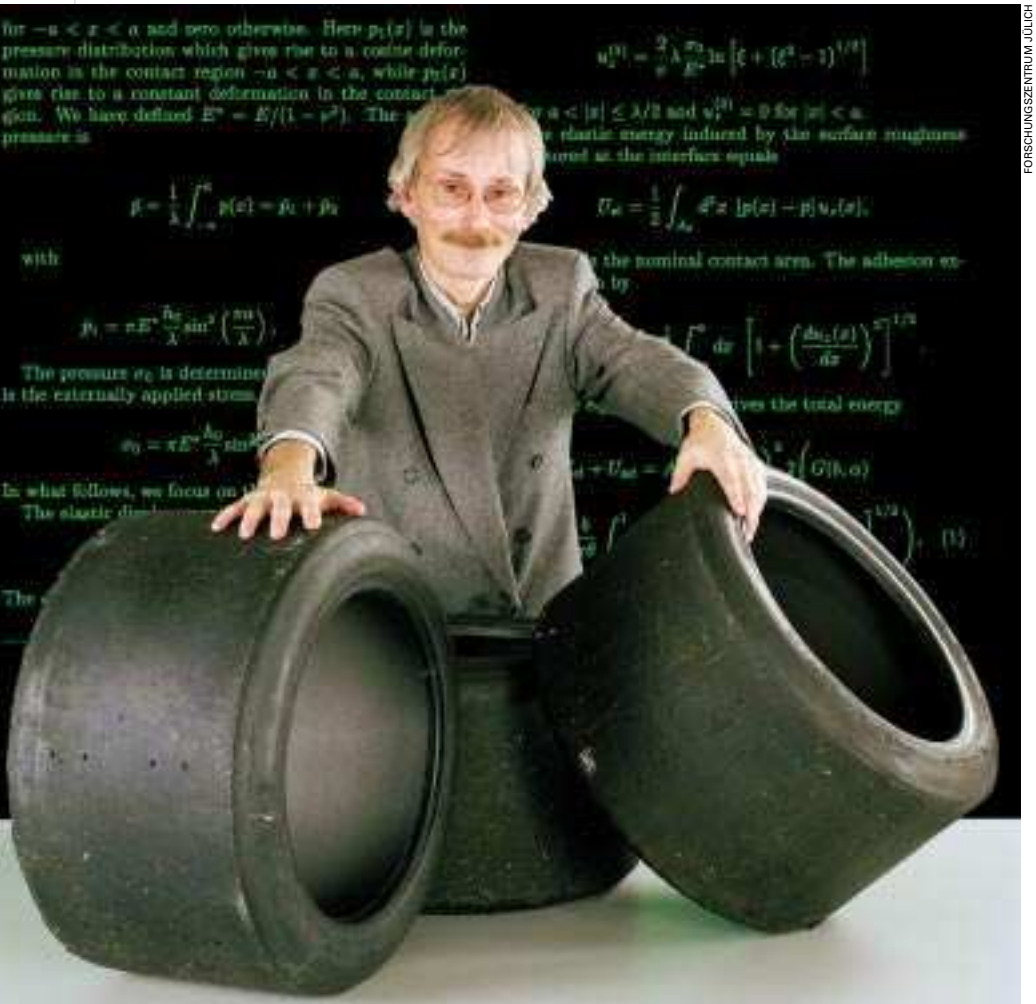
Persson hingegen benötigt nur noch eine kleine Gummiprobe. An ihr misst er, wie elastisch die neue Mischung ist und wie gut sie Stöße abfängt. Der Computer simuliert dann die wichtigsten Eigenschaften eines daraus hergestellten Reifens. »Im Jahr 2001 haben wir zehn neue Rezepturen erst berechnet und dann in die Reifen-Praxis geschickt«, berichtet der Forscher. »Die Ergebnisse von Theorie und Praxis stimmten sehr gut überein.« Das erspart der Industrie eine Menge Zeit und Kosten, kann sie doch künftig ihre Mixturen zuerst durchrechnen und dann nur die mit den besten Resultaten für echte Tests bauen.

Während eine Stahlkufe auf Asphalt starr bleibt, schmiegt sich der elastische Gummi an das raue Profil der Unterlage an. Zugleich speichert er dabei Energie. Um beide Vorgänge nachzubilden, zerlegt Persson den Reifen rechnerisch in zwei Bereiche. Der erste besteht aus der Kontaktregion selbst. Hier geht es darum, möglichst genau zu erfassen, wie sich die weiche Reifenoberfläche in die Erhebungen und Vertiefungen des Asphalts hineinpresst. Der andere Bereich ist das sich verformende Innere des Gummis in der Nähe der Kontaktregion. Hier soll das Modell getreu nachbilden, wie das elastische Material geknetet und gewalkt wird.

Der Spiegel im Spiegel

Bisher bereitete vor allem ein Umstand bei der Modellierung Probleme: Der Gummi schmiegt sich zwar an die schroffen »Berge« des harten Untergrunds an, füllt aber dessen »Täler« nicht komplett aus. Das gilt überraschenderweise unabhängig davon, mit welcher Vergrößerung man die Kontaktfläche betrachtet. Diese verblüffende »Selbstähnlichkeit« auf verschiedenen Längenskalen ist ein entscheidendes Merkmal, das frühere Theorien nur grob berücksichtigten. Sie brachte Bo Persson auf einen mathematischen Trick, der sein Modell enorm vereinfacht: Er beschreibt die Oberflächen als Fraktal. Fraktale Geometrien wurden in den 1980er Jahren als »Apfelmännchen-Bilder« berühmt. Ihre Strukturen wiederholen sich bei jeder Vergrößerung und treiben so ein unendliches mathematisches Spiel, das an den Spiegel im Spiegel im Spiegel erinnert.

Die Modellierung muss allerdings an der richtigen Stelle abbrechen. Es gibt nämlich eine größte und eine kleinste Längenskala, bei der die Selbstähnlichkeit noch die physikalische Realität abbildet. Beim Kontakt zwischen Reifen und Asphalt liegt die Obergrenze im Bereich einiger Millimeter. Das ist gerade die Größe der Sandkörner im Teer. Auf der anderen Seite geben winzige Staubpartikel von wenigen Mikrometern (millionstel Metern) Durchmesser die kleinste Skala vor. Solche Teilchen, die zum Beispiel aus dem Reifenabrieb stam-



FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH

Bo Persson vom Forschungszentrum Jülich gab der Reifenforschung ein theoretisches Fundament, das sie erheblich vereinfacht.

men, setzen sich auf der Gummioberfläche fest. Zwischen den Skalengrenzen liegen also drei Größenordnungen: Die Oberflächenrauigkeit in jedem dieser Maßstabsbereiche leistet einen gleich wichtigen Beitrag zu Perssons Rechenmodell. So berücksichtigt es die Topografie des Kontakts viel genauer als ältere Theorien und liefert erheblich realistischere Resultate.

Reifenentwickler interessieren sich für die dynamischen Fahrzustände des Rollens und Rutschens beim Bremsen, Beschleunigen und Kurvenfahren. In all diesen Situationen übt das Höhenprofil des Asphalts auf jeder Längenskala Kräfte auf den Gummi aus, die im Rhythmus der mikroskopischen Berge und Täler ansteigen und wieder fallen. Diese »oszillierenden« Kräfte lassen den Gummi bei großen Längenskalen mit niederen und bei kleinen mit hohen Frequenzen schwingen. Dabei speichert er in seinem Inneren Verformungsenergie, die er gleich darauf wie eine Feder wieder an den Untergrund abgibt – allerdings nicht völlig, wie Persson betont: »Es entstehen enorme innere Reibungskräfte und ein gewisser innerer Energiestau.«

Interessant ist dabei ein Blick in die Welt der Moleküle im Gummi. Diese großen Polymerketten reagieren auf die Deformationskräfte, indem sie sich teilweise umlagern. Solange sie genug Zeit dazu haben, bleibt der Gummi weich. Das gilt für niedere bis mittlere Schwingungsfrequenzen. Bei hohen Frequenzen können die Moleküle den Kraft-Pulsen aber nicht mehr folgen: Der Gummi wird hart wie Glas.

FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH, M. SCHERGE

Ein Flüssigkeitsfilm gibt Insekten Halt auf glattem Glas.

Dem Physiker aus Jülich ist es gelungen, diese Dynamik bis in den Grenzbereich hinein zu simulieren. Dabei vermag er sogar die Wirkung von Schmutzpartikeln oder Flüssigkeitsfilmen zu berücksichtigen, die zwischen Gummi und Straße geraten. Letztere können die Haftkraft mindern, aber auch das Gegenteil bewirken: Ausdünstende Harze sorgen zum Beispiel dafür, dass Rennreifen regelrecht auf der Straße kleben. Der Preis dafür ist allerdings das schnelle Auslaugen der Reifen. Hier hat die Biologie ihre Nase noch weit vor der Technik: Sie versieht die Füße ihrer Haftkraft-Akrobaten mit Drüsen, die den klebrigen Flüssigkeitsfilm ein Leben lang ausscheiden.

Da Haftung nicht nur eine Angelegenheit von natürlichen oder künstlichen »Füßen« ist, berät Bo Persson mittlerweile sogar die Kosmetikindustrie. So manches Haarspray verdankt seine Wirkung nämlich einer feinen Gummischicht: Sie überzieht die Haare, verändert die Reibung zwischen ihnen und verleiht so der Frisur Form und Fülle. Wer weiß, vielleicht werben einschlägige Hersteller bald mit einem »Fraktal-Spray«? ◁

Der Physiker **Roland Wengenmayr** ist Wissenschaftsjournalist und Redakteur bei »Physik in unserer Zeit«.

MEDIZIN

Mit Bakterien gegen faule Zähne

Eine Impfung könnte künftig vielleicht Löcher in den Zähnen verhindern. Gentechnisch veränderte Lactobazillen, die Antikörper gegen *Streptococcus mutans* auf ihrer Oberfläche tragen, fangen den Karieserreger damit ein.

Von Petra Jacoby

Neben vielen harmlosen Bakterien leben im Zahnbelag auch Streptokokken, die Hauptverursacher von Karies. Sie ernähren sich von Zucker aus Nahrungsresten und schädigen die Zahnsubstanz durch die Milchsäure, die sie als Stoffwechselprodukt ausscheiden. Der Ätzvorgang benötigt zwar Zeit, sodass sich Karies eigentlich durch regelmäßiges Zähneputzen verhindern lässt. Oft entgehen Streptokokken aber an schwer zugänglichen Stellen zwischen den Zähnen den Bürstenattacken. Trotz aller Mundpflege entsteht dann ein Loch im Zahnschmelz. Daher können sich nur 0,8 Prozent der Deutschen naturgesunder Zähne ohne Füllungen erfreuen.

Seit in den 1970er Jahren der Zusammenhang zwischen *Streptococcus mutans* und Karies erkannt wurde, versuchen Forscher einen Impfstoff gegen das missliebige Bakterium zu entwickeln. Ursprünglich strebten sie eine aktive Immunisierung an. Dabei sollen Eiweißmoleküle des Erregers, die auf die Mund- oder Nasenschleimhaut gesprüht werden, das Abwehrsystem dazu veranlassen, mit dem Speichel schützende Antikörper auszuscheiden. Klinische Studien mit derartigen Sprays zeigten aber, dass die Immunreaktion nur sehr schwach ausfällt. Deshalb ist es fraglich, ob sich die Bildung von Karies auf diese Weise verhindern lässt.

Passiv-Impfungen, bei denen der Organismus die Abwehrmoleküle nicht selbst produziert, scheinen dagegen aussichtsreicher. Man kann im Labor mit Hilfe von Zellkulturen besonders wirksame Antikörper herstellen, die sich an das Oberflächenprotein SAI/II *(streptococcal antigen I/II)* von *S. mutans* anlagern. Mit diesem Molekül heftet sich der Karieserreger normalerweise an den Speichelfilm auf den Zähnen. Ist es durch einen Antikörper blockiert, kann sich das Bakterium nicht mehr im Mund festsetzen.

Das belegen Tests mit Personen, deren Zähne mit einer solchen Antikörperlösung eingepinselt wurden. Sie besaßen nach der Behandlung deutlich weniger gefährliche Streptokokken in der Plaque als die Teilnehmer der Kontrollgruppe. Bislang war dieser Weg der passiven Immunisierung allerdings nicht praktikabel, da sich isolierte Antikörper im Mund nur kurze Zeit halten und die Zähne deshalb ständig behandelt werden müssten.

Lennart Hammarström und seine Mitarbeiter vom Zentrum für Oralbiologie in Huddinge (Schweden) haben nun gemeinsam mit Kollegen aus den Niederlanden und Großbritannien eine abgewandelte Pas- ▷

siv-Impfmethode entwickelt, die dieses Problem äußerst trickreich umgeht *(Nature Biotechnology, Bd. 20, S. 702)*.

Das dahinter stehende Prinzip ist einfach: Die Antikörper werden direkt im Mund von genmanipulierten Bakterien der Art *Lactobacillus zeae* produziert und in deren Zellwand integriert, was sie vor dem Abbau schützt. Lactobazillen sind für den Menschen völlig ungefährlich. Schon seit Jahrhunderten benutzt man sie zur Herstellung vieler Lebensmittel wie Joghurt, Käse oder Salami.

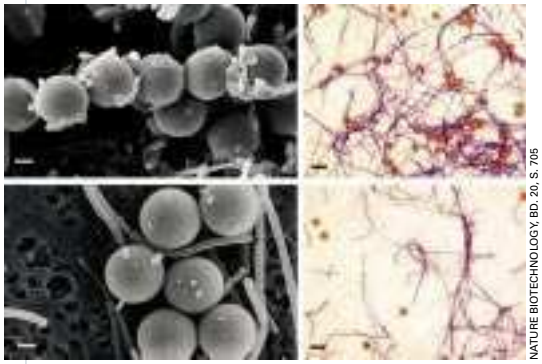
Die Wissenschaftler mussten allerdings zunächst eine stark verkleinerte Version des potenten Antikörpers gegen das SAI/II-Protein von *S. mutans* konstruieren, indem sie aus der entsprechenden Erbsubstanz gezielt nur die beiden Abschnitte herausschnitten, die für die Bindungsstelle des Antikörpers verantwortlich sind, und sie miteinander verketteten. Erst ohne den unnötigen Ballast ist die DNA kurz genug, um sie in *L. zeae* einschleusen zu können. Die gentechnisch veränderten Bakterien lesen die fremde Erbinformation ab und synthetisieren große Mengen der Mini-Antikörper, die sie dann auf ihrer Oberfläche tragen.

Bei Impfversuchen mit Ratten siedelten sich die aufgerüsteten Mikroben problemlos auf der Mundschleimhaut an. Für Karieserreger wirken sie wie Klebfallen. Die meisten binden sich mit ihren vielen SAI/II-Proteinen nicht mehr an Zähne, sondern an die Antikörperhüllen der genetisch veränderten Bakterien und verklumpen dadurch mit ihnen. Im Endeffekt werden sie schließlich heruntergeschluckt und im Magen verdaut.

Tierversuche bestätigen die schützende Wirkung der Lactobazillen. Die Forscher impften entspeichelte Ratten, die normalerweise extrem schnell Karies bilden, mit den Antikörper produzierenden Bakterien und strichen ihre Mundhöhle vier Tage später mit *S. mutans* ein. Nach knapp drei Wochen zeigten sich deutliche Unterschiede: Immunisierte Tiere besaßen signifikant weniger Streptokokken auf ihren Zähnen als unbehandelte. Zugleich entwickelten in der geimpften Gruppe weniger Ratten Karies, und die Anzahl der Löcher, die trotz der Behandlung entstanden, war deutlich niedriger als in der Kontrollgruppe.

Genmanipulierte Lactobazillen könnten somit eine elegante Methode zur passiven Immunisierung gegen Zahnkaries darstellen. Das Prinzip, dem Organismus langfristig Antikörper mit Hilfe harmloser Bakterien zuzuführen, bietet sich aber auch für die Prophylaxe und Therapie vieler anderer Krankheiten an. Fast jeder Abschnitt des Verdauungstrakts kann von einer *Lactobacillus*-Spezies besiedelt werden. Mit der DNA für die entsprechenden Mini-Antikörper ausgestattet, wären Lactobazillen daher auch geeignet, beispielsweise im Magen Bakterien der Art *Helicobacter pylori* abzufangen, die dort die Schleimhaut schädigen und Geschwüre induzieren, oder im Dünndarm Durchfallerreger in Schach zu halten. ◁

Petra Jacoby ist Diplom-Biologin und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Wittlich.



NATURE BIOTECHNOLOGY, BD. 20, S. 705

Genetisch veränderte Lactobazillen, die Antikörper gegen das Protein SAI/II des Karieserregers *Streptococcus mutans* produzieren, heften sich an Kügelchen, die mit diesem Protein beschichtet sind (oben). Sie könnten *S. mutans* unschädlich machen. Unten der Kontrollversuch mit normalen Lactobazillen.

MATHEMATIK

Ein Netz guter Beziehungen

Mit verbesserten mathematischen Modellen für »Kleine Welten« lassen sich Phänomene wie die Ausbreitung von Epidemien, die begrifflichen Verknüpfungen innerhalb einer Sprache oder die Verwundbarkeit des Internet weit realistischer simulieren als zuvor.

Von Thilo Körkel

Gute Beziehungen sind das halbe Leben. Mensch A bittet Mensch B, die Sache X für ihn zu tun. Aber B weiß auch nicht weiter und geht zu C; denn dieser kennt D, der schließlich X für A erledigt. Genau das verstehen Mathematiker unter einer Kleinen Welt *(small world)*: ein Netz von guten Beziehungen, in dem beliebige D immer nur wenige Zwischenstationen von A entfernt sind.

Im Jahre 1967 konnte der amerikanische Psychologe Stanley Milgram in einem Experiment eindrucksvoll demonstrieren, dass die Welt, in der wir leben, in diesem Sinne klein ist. 160 Aktienbesitzer aus dem US-Staat Nebraska sollten in Briefkontakt zu einem Mann treten, über den sie kaum mehr wussten, als dass er ein Aktienhändler war und in der Umgebung von Boston in Massachusetts wohnte.

In Ermangelung einer Anschrift sollten die Versuchspersonen den Brief einfach einem ihrer Bekannten übergeben, von dem sie annahmen, dass er dem Gesuchten »näher« sein könnte – etwa weil er in einer ähnlichen Branche tätig war oder ebenfalls in Boston wohnte. Dieser wiederum wurde gebeten, den Brief nach demselben Verfahren weiterzuleiten. Das erstaunliche Ergebnis: Jeder vierte Brief kam an – im Durchschnitt über gerade einmal fünf Stationen.

Der schnelle Weg ans Ziel war kein Zufall. In vielen komplexen Netzen, ob sie nun aus sozialen Beziehungen, Internetverbindungen oder gar aus Verwandtschaften sprachlicher Begriffe geknüpft sind, ist die durchschnittlich benötigte Anzahl der Schritte von einer Station zu einer beliebigen anderen erstaunlich klein.

Mathematiker sind von dem Phänomen fasziniert und untersuchen es auf ihre Art: Sie denken sich Menschen kurzerhand als abstrakte »Knoten« und Briefe als »Verknüpfungen« und lassen auf Basis dieser Grundbegriffe ein Netzmodell im Computer entstehen.

Die durchschnittliche kürzeste Weglänge ist allerdings nur eine von mehreren interessanten Eigenschaften. Eine weitere trägt die Bezeichnung »Klumpigkeit« *(clustering)*. Darunter versteht man die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Knoten im Netz,

Wer hat, dem wird gegeben

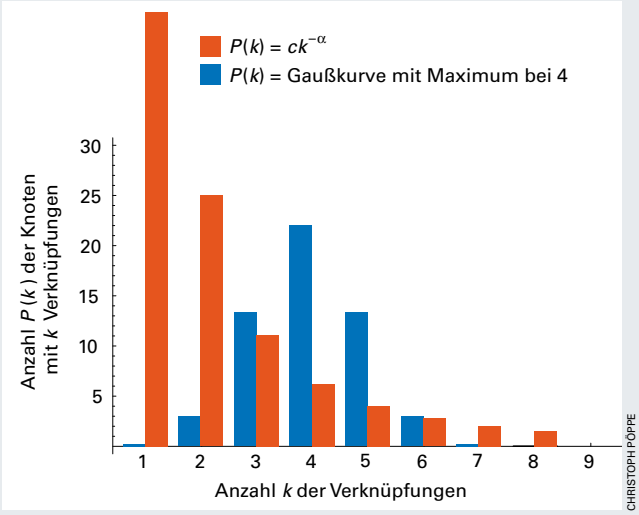
Zu einem Netz kommen neue Knoten und neue Verbindungen zwischen ihnen hinzu: mal langsam wie in einem Bekanntenkreis, mal explosiv wie im Internet. Aber so zufällig, wie das Wachstum im Einzelnen aussieht, ist es gar nicht.

Wenn beispielsweise ein mitteilsamer Mensch das Internet um eine neue Web-Seite bereichert, wird er sie am wahrscheinlichsten (durch »Hyperlinks«) mit solchen Seiten verknüpfen, auf die schon viele andere Links zeigen. Denn diese sind meist die wichtigsten oder interessantesten Seiten (auf diesem Prinzip basiert etwa auch die Suchmaschine Google, siehe Spektrum der Wissenschaft 7/2002, S. 106). Eine bestehende Web-Seite profitiert also umso stärker vom Wachstum des Netzes, je besser verknüpft sie ist. Wer schon viele Sexualkontakte hatte, wird mit Hilfe seiner Erfahrungen schnell weitere knüpfen können. Und wer reich ist, kommt schnell zu noch mehr Geld.

Am Ende gibt es viel mehr uninteressante als interessante Web-Seiten und mehr Menschen mit wenigen sexuellen Erfahrungen als solche mit vielen. Genauer ausgedrückt: Die Anzahl $P(k)$ der Knoten mit k Verknüpfungen nimmt mit wachsendem k ab, und zwar nach dem Potenzgesetz $P(k) = ck^{-\alpha}$.

Beispielsweise gibt es in einem solchen Netz mit $\alpha = 3$ stets ungefähr achtmal so viele Knoten mit k Verknüpfungen wie Knoten mit $2k$ Verknüpfungen. Während c nur eine unwesentliche Proportionalitätskonstante ist, beschreibt der Skalierungsexponent α (alpha) eine interessante Eigenschaft des Netzes: Er bleibt unverändert, wenn man die Maßeinheit (»Skala«) für k oder $P(k)$ ändert. Daher heißt ein solches Netz »skalenfrei«.

Ein Beispiel für ein nicht-skalenfreies Netz ist dagegen ein regelmäßiges Gitter aus Personen, die in einem Schachbrettmuster angeordnet sind und ausschließlich zu denjenigen Nachbarn Kontakte unterhalten, die rechts und links von ihnen sowie vor und hinter ihnen stehen. Selbst wenn eine reale Verteilung der Kontakte gelegentlich von dieser idealisierten Vorgabe abweicht, zeigt $P(k)$ für dieses Netz ein ausgeprägtes Maximum bei $k = 4$.



Bei skalenfreien Netzen folgt die Anzahl der Verknüpfungen, mit denen die Knoten ausgestattet sind, einem Potenzgesetz (rot). In regelmäßigen Gittern existiert dagegen eine typische oder »bevorzugte« Anzahl von Links, wodurch sich eine glockenförmige Verteilung mit einem Maximum bei diesem Wert ergibt (blau).

die jeweils mit einem dritten verknüpft sind, auch eine direkte Verbindung miteinander besitzen. Das Netz der Regierungschefs ist hochverklumpt: Wenn Gerhard Schröder häufiger sowohl mit George Bush als auch mit Wladimir Putin telefoniert, kann man davon ausgehen, dass der Amerikaner und der Russe auch direkte Kontakte miteinander pflegen. Kleine Welten sind im Allgemeinen relativ klumpig.

Außerdem aber haben sie noch eine dritte interessante Eigenschaft: Sie sind in der Regel skalenfrei (siehe Kasten oben). Das bedeutet, dass für alle Maßstäbe (Skalen) ein und derselbe Exponent bestimmt, wie viele Knoten mit einer bestimmten Zahl von Verknüpfungen existieren.

Bis vor kurzem nun schafften es die Mathematiker nicht, künstliche Netze zu erzeugen, die alle drei Eigenschaften in sich vereinen. Irgendein Zufallsnetz zu knüpfen (oder vom Computer knüpfen zu lassen) ist nicht schwer. Man greift aus einer vorgegebenen Menge von Knoten auf gut Glück zwei heraus und stellt eine Verbindung zwischen ihnen her. Das Ganze wiederholt man viele Male, wobei auch bereits verknüpfte Knoten immer wieder ausgewählt werden können. Ein solches Netz ist allerdings nicht skalenfrei. Vielmehr stellt sich eine bevorzugte Zahl von Verknüpfungen ein, die umso größer ist, je später man mit dem Verknüpfen aufhört. Und besonders klumpig ist es auch nicht: Die beiden flüchtigen Bekannten, die der Zufall mir beschert hat, dürften sich nur in den seltensten Fällen untereinander kennen.

Von der Dorfidylle zur Kleinen Welt

Um ein maximal klumpiges Netz im Computer zu erzeugen, kann man die Knoten in die Ecken eines Dreiecksgitters setzen und jeden mit seinen sechs nächsten Nachbarn verbinden. Diese dörfliche Idylle wird bereits durch relativ wenige Fernverbindungen gewaltig aufgemischt: Einige zufällig ausgewählte »Abkürzungen«, das heißt Verbindungen zwischen ansonsten weit entfernten Knoten, machen eine Kleine Welt daraus.

Allerdings ist auch dieses Netz nicht skalenfrei. Kleine Welten mit dieser Eigenschaft zu konstruieren, ist erst vor eineinhalb Jahren Amit R. Puniyani von der Universität Stanford (Kalifornien) gelungen. Das Prinzip seiner Konstruktionsmethode immerhin ist einfach: Man nehme eine Menge von Knoten, an denen »Seile mit losen Enden« baumeln. Je zwei dieser Seile ergeben gemeinsam eine Verknüpfung zwischen den Knoten, von denen sie ausgehen. Welche Enden miteinander verschlungen werden, bestimmt wiederum der Zufall – allerdings mit der Bedingung, dass kein Knoten mit sich selbst verbunden oder eine schon bestehende Verbindung verdoppelt wird. Indem man die Anzahl der losen Enden für jeden Knoten geeignet wählt, kann man erreichen, dass das ma- ▷

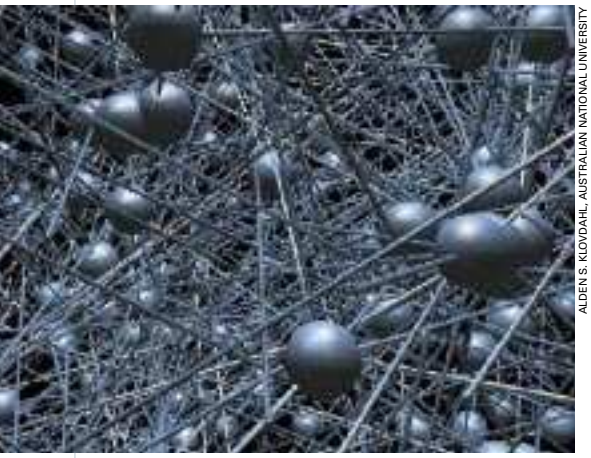
▷ thematische Gesetz der Skalenfreiheit von vornherein erfüllt ist.

Nachdem die Mathematiker alle drei Eigenschaften – kurze Wege, Klumpigkeit und Skalenfreiheit – gemeinsam in einem Netz untergebracht hatten, fanden sie bei ihren Simulationen Erstaunliches. Unter anderem konnten sie Milgrams Ergebnis bestätigen. Eine skalenfreie Kleine Welt aus 10 000 Knoten, geknüpft nach dem neuen Verfahren, hat eine »durchschnittliche kürzeste Weglänge« (nennen wir sie *L*) von fünf. Jeder ihrer Knoten kann also, wie bei Milgrams Experiment, von jedem anderen über durchschnittlich nur fünf Zwischenschritte erreicht werden.

Schwillt nun dieses Netz auf hundert Millionen Knoten an und behält seine Strukturmerkmale bei, so erhöht sich *L* auf gerade einmal 6,5. Die Briefe der Aktienbesitzer wären also selbst dann über relativ wenige Zwischenschritte angekommen, wenn Milgram einen Adressaten außerhalb der USA gewählt hätte. In einer Kleinen Welt ohne Skalenfreiheit würde sich die kürzeste Weglänge dagegen vervielfachen.

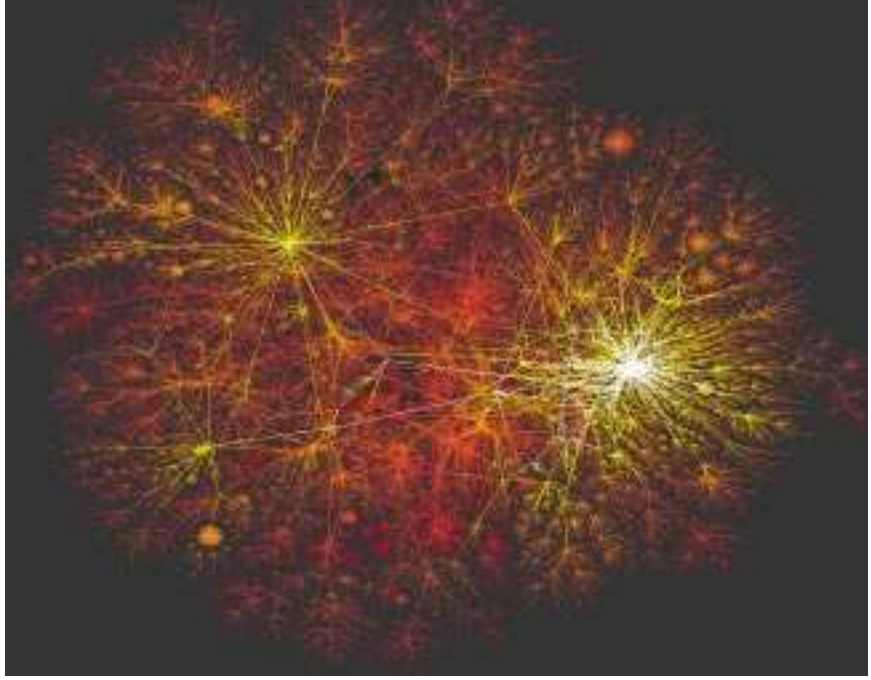
Die Skalenfreiheit hat aber auch sehr konkrete Konsequenzen für die Verwundbarkeit eines Netzes – eine Frage, die schon beim Aufbau des Arpanet, des militärischen Vorgängers des Internets, eine entscheidende Rolle spielte. Skalenfreie Netze werden durch den Ausfall einzelner Knoten und Links kaum beeinträchtigt, sind aber gezielten Attacken gegenüber äußerst verwundbar. In manchen Modellen reicht es schon, die zwei Prozent am besten verknüpften Knoten außer Gefecht zu setzen. Dann verdoppelt sich *L*, und die Effizienz des Netzes sinkt drastisch. Werden ebenso viele Knoten rein per Zufall abgeschossen, bleibt *L* dagegen praktisch unverändert.

Was im einen Fall verheerend wirkt, kann im anderen segensreich sein. Wird



ALDEN S. KLOVDAHL, AUSTRALIAN NATIONAL UNIVERSITY

Kleine Welten können sehr unübersichtlich sein: Ausschnitt aus dem Beziehungsnetz zwischen 6000 Personen in der australischen Hauptstadt Canberra.



K. C. CLAFFY, COOPERATIVE ASSOCIATION FOR INTERNET DATA ANALYSIS

Da das Internet-Verknüpfungsmuster – ebenso wie das Netz ungeschützter Sexualkontakte – skalenfrei ist, schadet ihm der zufällige Ausfall einzelner Knoten und Links kaum. Das gezielte Ausschalten besonders stark verknüpfter, »zentraler« Knoten beeinträchtigt die Übertragung – von Informationen oder Aids – allerdings erheblich.

zum Beispiel das Netz ungeschützter menschlicher Sexualkontakte an geeigneten Stellen unterbrochen, könnte dies die Ausbreitung von Aids verlangsamen. Nach einer empirischen Untersuchung unter 2800 Schweden haben die aktivsten zehn Prozent der Männer 48 Prozent aller Sexualkontakte, bei Frauen liegt der Wert bei 40 Prozent. Da sich das betreffende Netz als skalenfrei erwiesen hat, sollten die am besten verknüpften »Knoten« laut Theorie am stärksten zur Ausbreitung der Epidemie beitragen – eine Erkenntnis, die dem gesunden Menschenverstand jedenfalls nicht widerspricht. Während eine breit angelegte Safer-Sex-Kampagne nur zufällig ausgewählte Knoten aus dem Verkehr zieht und *L* dabei konstant lässt, könnte eine Initiative, die sich gezielt an die Promisken in der Gesellschaft richtet, mehr Erfolg versprechen, da sie die Ansteckungswege verlängert.

Andererseits ist nicht jede Modellierung eines Netzes sinnvoll. Das zeigt sich zum Beispiel an einer Untersuchung, die die Wörter einer Sprache als Knoten betrachtete. Zwischen zwei davon sollte genau dann eine Verknüpfung bestehen, wenn sie die gleichen Begriffe ausdrücken. So ist beispielsweise im Deutschen das Wort »Klang« eng mit »Lehm« verbunden – über den Begriff »Ton«.

Das verblüffende Ergebnis der Studie: Über durchschnittlich nur drei Links hängt jedes Wort mit jedem anderen zusammen. Mit maximal fünf Zwischenschritten gelingen beliebige begriffliche Brückenschläge. Als Grund für die unerwartet engen Verbindungen innerhalb des Wortschatzes nennen die Autoren der Studie das Vorkommen vieler Homonyme – Wörter also, die gleichzeitig mehrere sehr unterschiedliche Bedeutungen aufweisen und so als effektive Abkürzungen durch das Netz dienen.

Den Bogen nicht überspannen

Doch was genau ist damit bewiesen? Das komplexe Netz der Sprache wird durch vielfältige Verknüpfungen zum Beispiel grammatischer oder semantischer Art zusammengehalten, keinesfalls jedoch ausschließlich durch Synonyme frei von jeglichem Kontext. Wer solche Komplexität über Gebühr vereinfacht, riskiert paradoxe oder gar unsinnige Ergebnisse – unter anderem, dass laut Duden eine »Verknüpfung« im Gehirn gleichzeitig ein »Knoten« darin ist.

Neueste Untersuchungen wecken auch Zweifel an einer zentralen Annahme der Modellierer: Die kurze Weglänge der Kleinen Welten komme durch die »Links großer Reichweite« zustande – diejenigen zwischen Knoten, die andernfalls nur über weite Strecken miteinander verbunden wären. Nach Untersuchungen von Adilson Motter von der Arizona State University

kommt es dagegen auf die »verkehrsreichsten« Links an – also diejenigen, über die besonders viele kürzeste Wege verlaufen. Gezielte Attacken auf diese Links, so zeigen Motters Simulationen, schwächen das Netz besonders stark. Aber diese Verknüpfungen zeichnen sich gerade nicht durch große Reichweite aus – im Gegenteil.

Dennoch liefern simulierte Kleine Welten einen kontinuierlichen Strom neuer Erkenntnisse. Mögliche praktische Anwendungen reichen von der Eindämmung von Epidemien über die Erforschung des Assoziativgedächtnisses bis hin zum Design von Elektrizitäts- und Computernetzen. Selbst die medikamentöse Beeinflussung des menschlichen Stoffwechsels, ein Netz aus Wechselwirkungen zwischen biologischen Parametern, lässt sich durch die Mathematik der Kleinen Welten beschreiben und so vielleicht besser durchschauen. ◁

Thilo Körkel ist Diplom-Physiker und Wissenschaftsjournalist in Frankfurt am Main.

CHEMIE

Das neue Einmaleins von Wasserstoff und Sauerstoff

Bisher als exotisch eingestufte Oxide des Wasserstoffs haben sich in Immunologie und Umweltschutz als überraschend bedeutsam erwiesen. Quantenmechanische Berechnungen zeigen warum.

Von Michael Groß

Vermutlich ist H_2O die bekannteste chemische Formel überhaupt. Zwei Wasserstoff- und ein Sauerstoffatom ergeben lebenswichtiges Wasser. Aber können sich dieselben Elemente auch in anderen Zahlenverhältnissen zu anders gearteten Substanzen verbinden? Dem einen oder anderen wird noch Wasserstoffperoxid (H_2O_2) einfallen – jener Stoff, der Brünette erblonden lässt. Und damit endet gewöhnlich das Einmaleins mit H und O. In Chemie-Lehrbüchern findet sich zwar noch düsteres Gemunkel über Wasserstoffpolyoxide H_2O_n mit vier, fünf oder noch mehr Sauerstoffatomen; doch die sind so instabil, dass sie sich nur in extremer Kälte und für sehr kurze Zeit durch spektroskopische Beobachtungen nachweisen lassen. Derart kurzlebige Molekülsorten können doch keine wichtige Rolle in der Biologie spielen, oder?

Das glaubte man zumindest, bis der Proteinforscher Richard Lerner und seine Mitarbeiter am Scripps-Forschungsinstitut in La Jolla (Kalifornien) vor etwa zwei Jahren eine überraschende Entdeckung machten. Alle Antikörper, die sie testeten, waren ebenso wie der entfernt mit ihnen verwandte *T*-Zell-Rezeptor in der Lage, Wassermoleküle mit einer energiereichen angeregten Form von Sauerstoff zur Reaktion zu bringen. Dieser so genannte Singulett-Sauerstoff kann durch Lichteinwirkung für kurze Zeit entstehen und ist zum Beispiel für das Vergilben von Kunststoff oder das Abblättern von Lacken in der Sonne verantwortlich. Bei Umsetzung mit Wasser entsteht, wie sich zeigte, zunächst das instabile Wasserstofftrioxid H_2O_3. Diese stark oxidierende Verbindung kann dann die vom Antikörper erkannten Fremdkörper ohne Mitwirkung anderer Bestandteile des Immunsystems direkt angreifen und wandelt sich dabei in Wasserstoffperoxid um. Da auch der *T*-Zell-Rezeptor die geschilderte Reaktion katalysiert, dürfte sie aber älter sein als das Immunsystem und zunächst vielleicht nur zum Entgiften von Singulett-Sauerstoff gedient haben.

Unerklärliche Synergie

Noch bevor die chemischen Einzelheiten der Wasseroxidation durch Antikörper aufgeklärt werden konnten, tauchte das ominöse H_2O_3 ebenso überraschend in einem ganz anderen Zusammenhang auf, der für den Umweltschutz bedeutsam ist. Seit mehreren Jahren wusste man, dass eine Kombination von Wasserstoffperoxid und Ozon (O_3) bei der Reinigung von kohlenwasserstoffverseuchtem Boden oder Wasser eine stärkere Wirkung entfaltet, als auf Grund der Reaktivität der einzelnen Bestandteile zu erwarten wäre. Niemand konnte sich diese Beobachtung so recht erklären. Im Januar 2002 präsentierten Anders Engdahl ▷

www.wissenschaft-online.de

wissenschaft-online

Wussten Sie schon: 2003 ist das Jahr der Chemie. Ein Jahr lang werden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in die Kaufhäuser und auf die Marktplätze gehen, erklären, woran sie forschen, und darlegen, welchen Nutzen jeder Einzelne davon hat. Diskutiert wird auf gleicher Augenhöhe – außerhalb des Elfenbeinturms.

Jahr der Chemie

wissenschaft-online berichtet regelmäßig über Veranstaltungen und Veröffentlichungen zum Jahr der Chemie. Darüber hinaus finden Sie Nachrichten, Interviews und Reportagen zum Thema. Diese werden im März über **www.wissenschaft-online.de/chemie** frei zugänglich sein.

Wir informieren Sie regelmäßig über den Tourplan des Chemie-Trucks, der aus Anlass des Jahres der Chemie in vielen Städten Deutschlands Station machen wird. Die Redaktion ist selbstverständlich beim Termin in Heidelberg persönlich anwesend und steht dort für Gespräche zur Verfügung.

www.wissenschaft-online.de

NACHGEHAKT

Bald »Beute« von Computer-Schwärmen?

Von Michael Springer

Eine Horrorvision des amerikanischen Erfolgsautors Michael Crichton (»Jurassic Park«) stürmte jüngst die Bestsellerlisten: In seinem neuen Roman »Beute« entwickeln karrieresüchtige Computertechniker im Auftrag des Militärs Daten verarbeitende und flugfähige Nanopartikel zur Feindüberwachung, die sofort außer Kontrolle geraten, intelligente Schwärme bilden und sich anschicken, die Weltherrschaft zu erringen. Crichton greift damit in belletristischer Form Warnungen des bekannten Computerwissenschaftlers Bill Joy auf, der in der baldigen Vermählung von Nano- und Biotechnik die Gefahr einer technologischen Selbstabschaffung der Menschheit zu sehen meint.

Crichton mischt in seinen Büchern stets Fiktion mit Fakten: Immerfort müssen seine Figuren im Dialog das Stichwort für belehrende Einschübe des Autors liefern, und zum Beweis, dass es ihm mit seinen Prognosen ernst ist, hängt er dem spannenden Reißer eine stattliche Liste mit Fachliteratur an. Darum die Frage: Wie real ist die Möglichkeit, dass die Miniaturisierung des Computers bis zu intelligenten Staubpartikeln fortschreiten wird?

Im Dezember des vergangenen Jahres versammelten sich führende Computertechniker in San Francisco zum »International Electron Devices Meeting«, um das Zukunftspotenzial der elektronischen Datenverarbeitung zu analysieren. Stolz zogen die Experten Bilanz: Die Halbleiterindustrie darf auf eine in der Technikgeschichte beispiellose Erfolgsserie zurückblicken. Im Jahre 1965 passten auf einen Computerchip dreißig Transistoren; heute sind es mehrere Milliarden *(Science, Bd. 299, S. 210, 10. Januar 2003)*.

Erwachsen aus der Vermählung von Bio- und Nanotechnik superintelligente Wesen?

Aber gerade das atemberaubende Entwicklungstempo brachte mehrere Vortragende zu der besorgten Frage: Wie lange kann dieses exponentielle Wachstum – ausgedrückt durch das Moore'sche Gesetz, wonach sich die Anzahl der Transistoren pro Chip etwa alle anderthalb Jahre verdoppelt – noch weitergehen? Wann wird die Miniaturisierung elektronischer Schaltkreise zunächst von praktisch-technologischen Problemen gebremst werden und letztlich an prinzipiellen physikalischen Grenzen zum Stillstand kommen?

Zwar operieren Computer noch immer weit unterhalb der fundamentalen Schranke, die Thermodynamik und Quantenmechanik dem »ultimativen Laptop« setzen (Spektrum der Wissenschaft 11/2000, S. 24). Dennoch wachsen mit schrumpfenden Transistoren die Energie- und Materialprobleme. Je kleiner ein Schaltkreis, desto weniger Strom fließt beim Einschalten, und desto mehr Kriechströme mogeln sich – unter anderem auf Grund des quantenmechanischen Tunneleffekts – hindurch, wenn er auf »Aus« steht. Damit auch winzigste Transistoren funktionieren, muss der Siliziumkanal zwischen Quelle und Senke intensiv mit Fremdatomen dotiert werden; die Dotierung lässt sich aber immer schlechter kontrollieren, je enger die Kanäle werden. Aus solchen Gründen müsste die Miniaturisierung herkömmlicher Silizium-transistoren, sollte sie weiter nach Moores Gesetz fortschreiten, bereits in rund zehn Jahren auf unüberwindliche Hindernisse stoßen.

Doch damit wäre, so die Experten, Moores letzte Stunde noch lange nicht gekommen. Schon sind Transistortypen in Arbeit, die im Prinzip nur mehr zehn Nanometer (millionstel Millimeter) lang sein müssten. Erst recht versprechen Kohlenstoff-Nanoröhrchen, vielleicht sogar einzelne Moleküle, die elektrostatisch zwischen zwei Zuständen geschaltet werden können, den Betrieb von Transistoren im Nanobereich.

Moores Gesetz könnte sogar noch vierzig Jahre in Kraft bleiben, wenn die Chiptechnologie die dritte Dimension erobert und räumlich angeordnete elektronische Bauteile produziert werden. Freilich wird bei derart dichter Packung die Kühlung zum Hauptproblem. Und selbst wenn dieses Problem gelöst würde: Was ist mit den »Drähten« zwischen den einzelnen Bauteilen? Auch für den Fall, dass es gelingt, bis an die Grenzen heute absehbarer Technik zu gehen und auf einem Chip eine Billion Transistoren zu integrieren – und zu kühlen! –, muss die zukünftige Nanoelektronik eine Lösung für die leitenden Verbindungen zwischen derart winzigen und dicht gepackten Halbleiterelementen liefern.

Nicht die Schaltelemente, sondern ihre Verbindungen setzen der Miniaturisierung Grenzen

Die technologische Schranke, an der das Moore'sche Gesetz zu scheitern droht, steckt also nicht in den Schaltelementen selbst, sondern in ihren Verbindungen – doch erst sie machen den »integrierten Schaltkreis« aus, auf dem der Siegeszug der Computer beruht. Den Ausweg aus diesem Dilemma sehen nun einige Visionäre in der Entwicklung quasi »desintegrierter Schaltkreise«. Statt die Miniaturisierung immer komplexerer Rechner mit allen nur denk- und machbaren technologischen Tricks immer weiter in atomare Größenordnungen zu treiben, könnte der Trend sich umkehren und zur Ausbreitung führen: zu »verteilter Intelligenz« *(distributed intelligence)*.

Schon in den 1960er Jahren dachte sich Stanislaw Lem in seinem klassischen Zukunftsroman »Der Unbesiegbare« einen Planeten aus, der ausschließlich von intelligenten Metallpartikeln besiedelt ist. Diese künstlichen Fliegen organisieren sich spontan zu aggressiven Schwärmen und attackieren alles, was sich bewegt. Ihre verteilte Intelligenz macht sie unbesiegbar, und darum haben sie auch nicht nur ihre Schöpfer – eine durch »normale« Bioevolution entstandene intelligente Zivilisation – ausgerottet, sondern überhaupt jede Spur von Leben, das es einst auf dem Planeten gab. Der Unterschied zu Crichtons moderner Variante ist vor allem, dass sich die intelligenten Schwärme bei Lem nicht aus Nanostaub

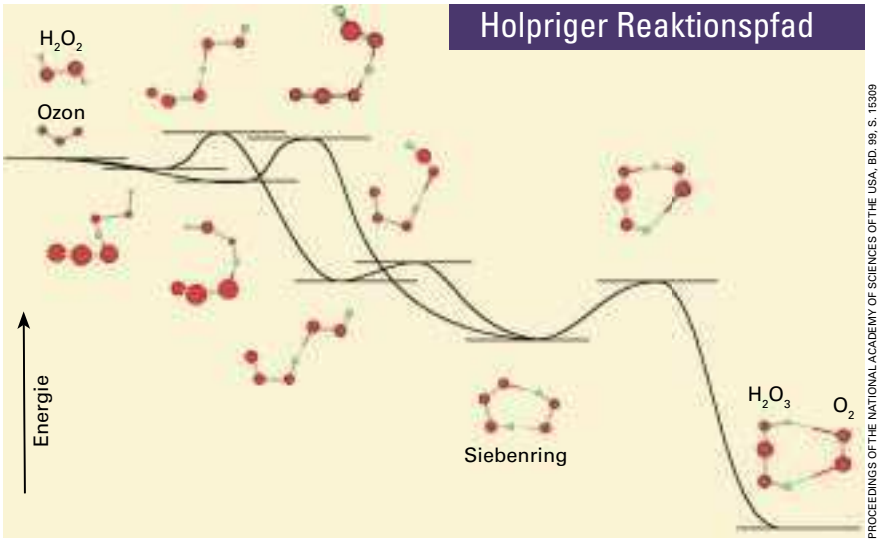
zusammensetzen, sondern aus millimetergroßen Winkelstücken.

Entscheidender sind die Gemeinsamkeiten: Bei Lem wie bei Crichton haben intelligente, biologisch entstandene Planetenbewohner eine Art Techno-Evolution in Gang gesetzt, die ihnen über den Kopf wächst (ob Crichton wirklich mit dem Ende der Menschheit Ernst macht, sei hier fairerweise nicht verraten). Crichton erwähnt »evolutionäre Algorithmen«, mit denen bereits heutige Rechner von selbst Problemlösungen entwickeln, und er gibt eine originelle Lösung für das notorische Problem der Nanotechnik: Wie baut man »Assembler« – die mikroskopischen Maschinen, die ihrerseits die noch tausendmal kleineren Nanomaschinen bauen? Crichton empfiehlt, bei der Natur in die Lehre zu gehen, die derlei Kunststücke in lebenden Zellen seit jeher beherrscht, und lässt die Produktion des Nanostaubs von gentechnisch manipulierten Mikroorganismen besorgen.

Doch wie der Vergleich mit Lems altem Roman zeigt, ist Miniaturisierung gar nicht das Problem. Ob die intelligenten Schwärme aus fliegengroßen Robotern oder aus Nanostaub bestehen – entscheidend ist, wie sie kommunizieren und sich organisieren. Selbst wenn das im Science-Fiction-Roman stillschweigend als gelöst unterstellt wird, kommen bei Lem wie bei Crichton nur recht primitiv agierende Gebilde zu Stande, die aggressiven Hornissenschwärmen oder Neuro-Parasiten ähneln.

Es dürfte einen guten evolutionären und kommunikationstechnischen Grund haben, das unser Gehirn nicht wie ein loser Schwarm organisiert ist, sondern als flexibel verdrahtetes Neuronennetz. Das Gehirn ist zugleich das beste Beispiel für einen Computer höchster Leistung, bei dem die Miniaturisierung der Bauelemente schon weit oberhalb des atomaren Niveaus Halt gemacht hat, während die Raffinesse vor allem in den Details der elektrochemischen Verbindungen steckt.

Michael Springer ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.



Zwei Wege führen quantenmechanischen Rechnungen zufolge von H_2O_2 und Ozon zum ominösen H_2O_3. Hauptetappe unter diversen Zwischenstadien, deren Energien und Strukturen hier gezeigt sind, ist ein Siebenring.

▷ und Bengt Nelander von der Universität Lund (Schweden) dann experimentelle Belege dafür, dass in diesem Gemisch ebenfalls das Trioxid H_2O_3 entsteht: Bei tiefen Temperaturen, eingefangen in einer »Matrix« aus gefrorenem Argon, ließ sich die flüchtige Verbindung anhand ihrer Molekülschwingungen identifizieren.

Damit ergibt sich eine völlig neue Landkarte von chemischen Reaktionen zwischen Wasserstoff und Sauerstoff. Bill Goddard vom California Institute of Technology in Pasadena und sein chinesischer Gastwissenschaftler Xin Xu machten sich kürzlich an die exakte Kartografierung, indem sie die verschiedenen Reaktionsmöglichkeiten und nötigen Energien quantenmechanisch berechneten *(Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, Bd. 99, S. 3376 und 15308)*.

Zentrale Wegkreuzung

Dabei kam heraus, dass das ehemals obskure Trioxid eine zentrale Wegkreuzung darstellt: Aus beiden Richtungen, sowohl von Wasser/Singulett-Sauerstoff als auch von Wasserstoffperoxid/Ozon aus, ist es relativ leicht zu erreichen. Der letztgenannte Reaktionsweg führt über eine weitere überraschende Verbindung aus Wasserstoff und Sauerstoff: einen siebengliedrigen Ring der Zusammensetzung (HOOO)(HOO). Dieser kann auf verschiedenen Wegen H_2O_3 freisetzen, je nachdem ob er die nötige Energie als Licht oder als Wärme erhält.

Auch auf dem Reaktionspfad, der vom Wasser ausgeht und von Antikörpern geebnet wird, fanden Xu und Goddard viele interessante Wegmarken und Zwischenstationen. So stellte sich heraus, dass Wassermoleküle außer als Reaktionspartner auch als Katalysatoren benötigt werden. Im Überschuss würden sie allerdings die Reaktion verhindern. Der entscheidende Beitrag der Antikörper liegt also vermutlich darin, dass sie genau die richtige Menge an Wassermolekülen in einer ansonsten von Wasser abgeschirmten Umgebung bereitstellen. Als wichtiger Zwischenstopp auf dieser Route entpuppte sich außerdem das bislang gleichfalls unterschätzte Tetraoxid H_2O_4.

Anhand der nun vorliegenden Steckbriefe dürfte es Forschern leichter fallen, die Polyoxide des Wasserstoffs zu erkennen, auch wenn sie nur für Millisekunden in Erscheinung treten. Gerade wegen ihrer hohen Reaktionsbereitschaft können kurzlebige Molekülarten besonders wirkungsvoll sein. Nachdem die Polyoxide auf derart unterschiedlichen Gebieten wie der Immunologie und dem Umweltschutz schon erstaunliche Talente an den Tag gelegt haben, wäre es nicht verwunderlich, wenn sich herausstellte, dass sie auch anderswo einen kurzen, aber fulminanten Auftritt haben. Sie genauer kennen zu lernen kann da nur von Nutzen sein. Zu den Risiken und Nebenwirkungen zählt, dass Studierende künftig im Kapitel über die Wasserstoff-Sauerstoff-Verbindungen einige Formeln mehr lernen müssen als nur H_2O und H_2O_2. ◁

Michael Groß ist Biochemiker und Science Writer in Residence am Birkbeck College in London.

(Seiten 18 bis 20: Anzeige und Beihefter)

REINHARD KURZENDÖRFER, TAUFKIRCHEN

Vielarmiger Dosenöffner

Tintenfische sind die Einsteins unter den Wirbellosen. In Lernversuchen legte der Gemeine Krake oder Oktopus eine Intelligenz an den Tag, die der von Säugetieren und Vögeln gleichkommt. Über rasche Wechsel zwischen vielfältigen, komplizierten Farbmustern können die Kopffüßer Emotionen ausdrücken und miteinander kommunizieren. Manche Forscher sehen darin sogar Elemente einer regelrechten Sprache. Die wahren Fähigkeiten der Tintenfische zu erkennen wird freilich dadurch erschwert, dass sie so wenig Ähnlichkeit mit uns Menschen haben. Doch manchmal kommen die verborgenen Talente unerwartet zum Vorschein. So hat am Münchner Zoo ein Krake kürzlich einen unverhofften Beweis seiner Klugheit und Geschicklichkeit geliefert. Tierpfleger konnten ihm beibringen, ein Glas aufzuschrauben, in dem sich Futter befindet. Wie die zwei Fotos dokumentieren, schnappt sich der Krake das Glas zunächst, schwimmt damit zu einem ungestörten Plätzchen und stülpt sich darüber. Dadurch lässt sich allerdings nur schwer erkennen, wie er den Verschluss genau aufschraubt. Jedenfalls geht alles ganz fix: Nach wenigen Sekunden ist das Glas offen und der Inhalt – hier Krabben – verspeist.

PETRA SCHRAMEK, MÜNCHEN

Die Revolution in der Gehirnforschung

Die Gehirnforschung erschließt den Kosmos in uns, vom Innenleben einzelner Nervenzellen bis zu ihrem Zusammenspiel. Heute beobachten Experten das Denkorgan auch bei der Arbeit.

Von Jean-Pierre Changeux

Kann das Gehirn sich selbst verstehen? Dieses Rätsel beschäftigt Philosophen seit jeher. Noch hat niemand, auch kein Neurowissenschaftler, enthüllt, wie Körper und Geist zusammenhängen – wie die anatomische Organisation des Gehirns und seine Aktivitätszustände mit seinen kognitiven Funktionen, kurz dem Denken, miteinander in Beziehung stehen.

Gleich den anderen Organen des Körpers besteht das Gehirn aus Zellen. Allerdings besitzen diese Zellen lange Ausläufer. Mit denen bilden sie untereinander ein unfasslich komplexes Netz. Wie die Nervenzellen, die Neuronen, miteinander Signale austauschen, haben Gehirnforscher in den letzten Jahren und Jahrzehnten immer genauer und detaillierter erforscht. Vor 25 Jahren hätte niemand vorausgesagt, dass sich die Erkenntnisse derart mehren würden. Schon erstellen die Wissenschaftler Karten zu den Verflechtungen von Hirngebieten. Ohne solches Grundwissen werden wir das Denken und das Bewusstsein nie begreifen. Trotzdem ist das Ziel, das Denken zu verstehen, noch lange nicht in Sicht.

Unserem Erkenntnisorgan, dieser hochkomplexen chemischen Maschine, auf die Schliche zu kommen, darum bemühen sich Forscher seit Jahrhunderten. Dass sich im Nervensystem elektrische Signale bewegen, entdeckte der italienische Arzt Luigi Galvani (1737–1798) Ende des 18. Jahrhunderts. Heute messen Neurobiologen mittels Elektroenzephalografie die elektrische Aktivität des Gesamtgehirns. Auf der anderen Seite vermögen sie im Gehirn das Verhalten von einzelnen Nervenzellen und sogar von einzelnen Molekülen zu registrieren. Ein anderer Meilenstein war die Entdeckung der Nervenzelle und ihrer Vielgestalt dank der Arbeiten des italienischen Histologen Camillo Golgi (1844–1926) und des spanischen Histologen Santiago Ramón y Cajal (1852–1934), die 1906 gemeinsam den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin erhielten.

Ramón y Cajal verdanken wir die Einsicht, dass das Nervennetz unseres Gehirns und Nervensystems aus individuellen, getrennten Neuronen aufgebaut ist, die allein die elektrischen Erregungen hervorbringen und über unzählige Verbindungsstellen – die Synapsen – untereinander in Kontakt stehen. Tatsächlich besteht unser Gehirn aus hundert Milliarden Neuronen, die ungefähr eine Billiarde berührungslose Kontaktstellen ausbilden.

Ein Dogma stürzt

Die vergangenen 25 Jahre brachten in den einzelnen Zweigen der Gehirnforschung viele wichtige Entdeckungen. Neurochemiker fanden die Neurotransmitter, die Botenstoffe der Nervenzellen, und deren Rezeptoren für den Signalempfang. Neurogenetiker spürten Gene für die Gehirnentwicklung auf. Kognitionsforscher beobachteten erstmals das Gehirn beim Denken und drangen somit auf das Feld der Psychologie vor. Aber Genetiker erkannten auch Gene, die für bestimmte neurodegenerative Krankheiten prädisponieren.

Jüngst erregte die Entdeckung von undifferenzierten, embryonalen Stammzellen im Gehirn Aufsehen. Vor 25 Jahren herrschte noch das Dogma, dass unsere Neuronen-Ausstattung vor

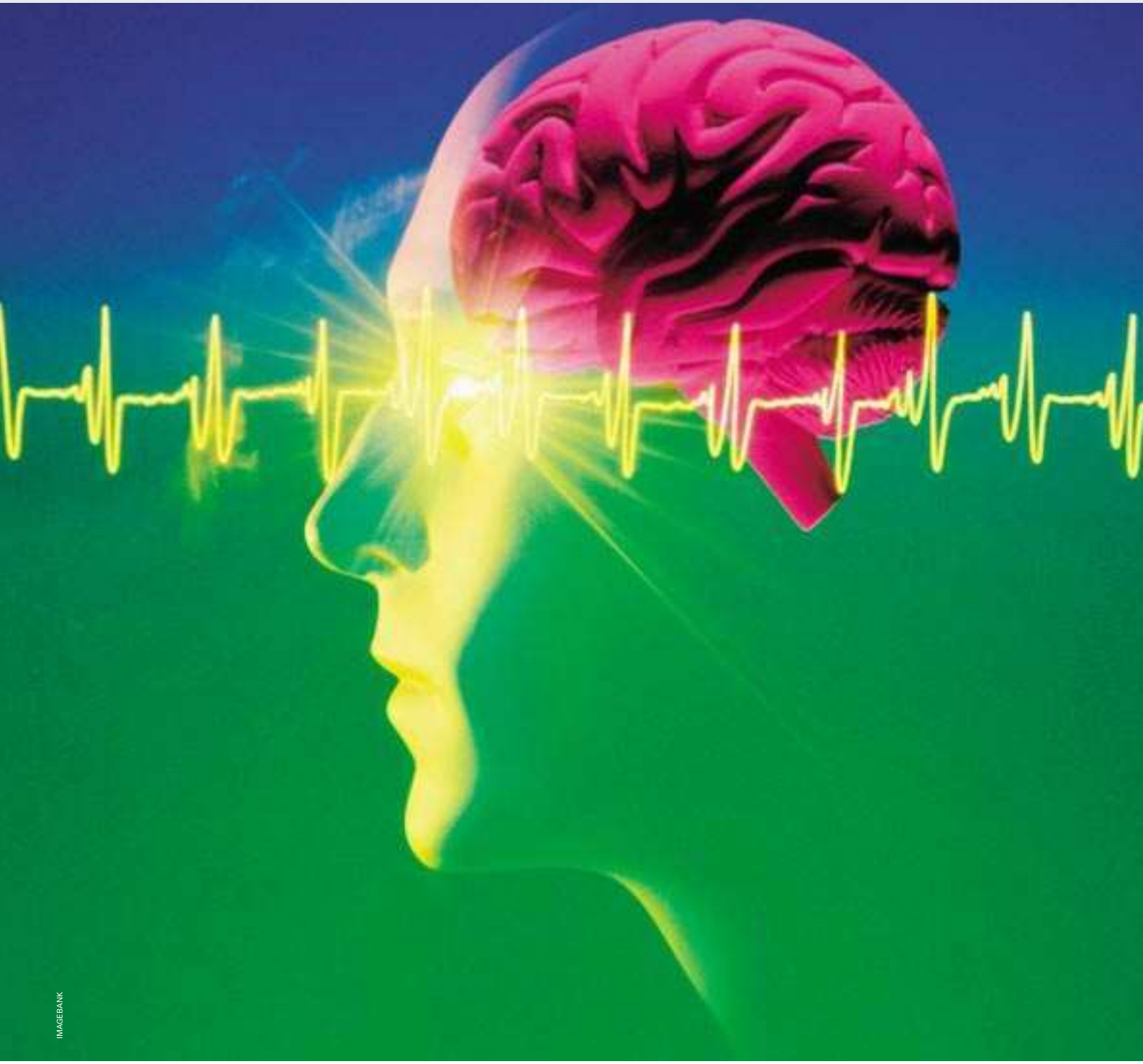
SERIE

25 Jahre Spektrum DER WISSENSCHAFT

In dieser 12-teiligen Serie berichten prominente Forscher aus ihrem Fachgebiet über wissenschaftliche Highlights der letzten 25 Jahre, die aktuelle Situation und künftige Perspektiven.

Teil I: Paläoanthropologie
Teil II: String-Physik
Teil III: Gehirnforschung

Im nächsten Heft
Teil IV: Erdklima



IMAGEBANK

Viele Forschungsrichtungen zusammen vermochten unerwartet tief in die Funktionsweise unseres Gehirns vorzudringen.

der Geburt festgelegt würde und von da an unvermeidbar schwinde. Unausgereifte Zellen, die sich erst später im Leben in Nervenzellen umwandeln können, galten bis vor kurzem als undenkbar.

Zuerst möchte ich auf die biochemischen Forschungen näher eingehen, an denen ich selbst beteiligt war. Dass Moleküle, so genannte Neurotransmitter, als Überträger von Signalen zwischen Nervenzellen dienen, erkannten Wissenschaftler Anfang des 20. Jahrhunderts. Während der 1970er Jahre explodierte das Wissen über diese Botenstoffe förmlich. Zu den schon bekannten Überträgermolekülen Acetylcholin und Noradrenalin gesellten sich mehr als ein Dutzend weitere: darunter Dopamin, Serotonin, Glutamat, GABA, Adenosin und Histamin. Über die hier aufgezählten Stoffe fanden Forscher damals heraus, auf welche Weise sie hergestellt und von den Zellen freigesetzt werden. Sie erkannten, wo im Gehirn jeweils die Neuronen liegen, die diese Stoffe produzieren. Auch die unterschiedliche Bedeutung der Transmitter in der neuronalen Kommunikation stellten sie fest. ▷

MARK SOLMS

Selbst beim Träumen lässt sich dem Gehirn jetzt zuschauen: Im Schnittbild sind Gehirngebiete koloriert, die in dieser Schlafphase aktiv sind.

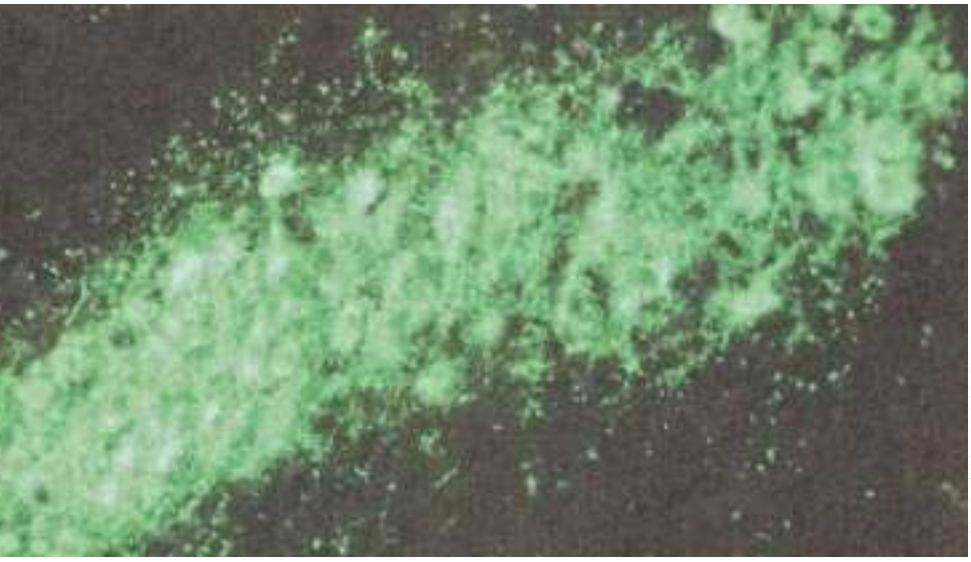
▷ Neurotransmitter wirken an den Synapsen, den Kontaktstellen der Nervenzellen. Dort kommen elektrische Signale an, die die Nervenzellen erzeugen und über ihre Fortsätze schicken. Solche Impulse entstehen, indem Natrium-, Kalium- und Chlorid-Ionen selektiv durch die Zellmembran treten. An der Synapse angekommen, bewirken diese Impulse über Calcium-Ionen, dass die Nervenzelle einen Neurotransmitter freisetzt. Der Botenstoff diffundiert nun durch den synaptischen Spalt zur Membran der anderen Zelle. Dort heftet er sich an ein Erkennungsmolekül, einen Rezeptor.

Derartige Empfänger-Moleküle hatte der britische Physiologe John Newport Langley (1852–1925) schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts postuliert. Zwischen 1970 und 1980 entdeckten Wissenschaftler schließlich verschiedene Rezeptoren. Im Jahr 1970 identifizierte unser Team den Rezeptor für Acetylcholin. 1974 gelang es uns, ihn auch zu isolieren. Wir führten diese Studien am elektrischen Organ des Zitterrochens durch und verwendeten Schlangengift. 1979 konnten wir eine Teilsequenz der Aminosäuren in dem Molekül bestimmen. Unabhängig von uns etablierte dann die Gruppe um Shosaku Numa von der Universität Tokio zwischen 1982 und 1983 die vollständige Sequenz des Acetylcholin-Rezeptors.

Nun gelang es, die Bindestelle am Rezeptor für Acetylcholin zu erkennen. Das ist dieselbe Stelle, an der sich auch Nikotin anlagert. Es stellte sich heraus, dass der Rezeptor in einem anderen Bereich einen Kanal bildet, durch den Ionen die Membran passieren können. Dieser Ionenkanal öffnet sich erst, wenn sich Transmittermoleküle an den Rezeptor anlagern: So wird das chemische Signal wiederum in ein elektrisches umgewandelt.

Es gibt auch Ionenkanäle, die nicht durch einen Transmitter angesteuert werden, sondern auf ein elektrisches Signal reagieren. Die erste solche Struktur klärte die Gruppe von Numa 1984 auf. Es handelte sich um den Natrium-Kanal, der für die Weiterleitung des elektrischen Nervenimpulses verantwortlich ist. In der Folge regten diese Erkenntnisse eine Vielzahl physiologischer Studien über Ionenkanäle an.

Bei diesem historischen Schnittpräparat eines Rattengehirns haben sich Nervenzellen des Hirnstamms grün angefärbt, die den Neurotransmitter Noradrenalin enthalten.



F. BLOOM, G. JONES UND J. MC GINTY

Hunger, Gedächtnis und Angst

Neben Rezeptoren mit Ionenkanal – wie die für Acetylcholin oder Glutamat – existiert an Zellmembranen eine weitere Kategorie. Diese entdeckte Robert Lefkowitz von der Duke University in Durham (North Carolina) Ende der 1970er Jahre. Solche Rezeptoren sind an chemische Umsetzungen im Zellinneren gekoppelt. Davon existieren in den gesamten Körperzellen über tausend verschiedene, die alle im Prinzip ähnlich aufgebaut sind. Diese Rezeptoren steuern die so genannten G-Proteine, wichtige Moleküle in den Zellen. Sie beeinflussen vielerlei physiologische Prozesse wie Atmung, Herzschlag oder Blutdruck und wirken auch beim Riechen und Schmecken mit. Im Gehirn helfen sie unter anderem psychomotorische, emotionale oder kognitive Ereignisse zu regulieren. Auf diese Art von Rezeptoren zielen viele starke pharmakologische Wirkstoffe, zum Beispiel die Neuroleptika.

Auch damit war das Arsenal an Rezeptoren noch nicht erschöpft. Schon lange rätselten Mediziner, warum der Mensch auf Morphium dermaßen stark anspricht. Physiologen sahen nur eine Erklärung: Im Zentralnervensystem musste es geeignete Erkennungsmoleküle geben, welche normalerweise mit körpereigenen Stoffen reagieren, deren Eigenschaften Morphium und anderen Opiaten ähneln. Die ersten so genannten endogenen Morphine, die Enzephaline, wurden 1975 isoliert. Bald folgten die eigentlichen Endorphine. Solche Neuropeptide blockieren die Schmerzübertragung und beeinflussen das Gefühlsleben. Eigentlich hatte Ulf von Euler die Neuropeptide schon 1931 entdeckt. Mit mehr als vierzig Vertretern bildet diese Molekülklasse eine sehr umfangreiche Gruppe von Neurotransmittern, die zum Beispiel Hunger, Gedächtnisbildung und Angst steuern. Neuropeptide können auch zusammen mit den klassischen Transmittern in ein und derselben Nervenzelle vorkommen. Sie halfen, neue Medikamente gegen Angstzustände, Schizophrenie oder Depression zu finden. Sie ermöglichten auch, die Wirkungsweise von Drogen und Suchtmechanismen zu erforschen.

Die Genetik trug ebenfalls maßgeblich zum heutigen Verständnis des Gehirns bei. Bis die Rohdaten von der Entzifferung des menschlichen Genoms analysiert sind, wird es noch Jahre dauern. Die Funktion der zigtausend ent-

deckten Gene aufzuklären und ihre Regulation zu entschlüsseln, dürfte noch einmal ein Mehrfaches an Aufwand erfordern. Können wir darauf hoffen, dass Genetiker eines Tages erklären, wieso sich unser Gehirn vor allen anderen auszeichnet? Werden sie herausfinden, wie ein Gehirn mit seinen diversen Aufgaben entstand und warum das menschliche so viel mehr kann als das von Schimpansen, obwohl der genetische Unterschied zwischen ihnen und uns geradezu winzig ist?

Die Aussicht besteht durchaus, dass genetische Vergleiche mit anderen Organismen viele dieser Fragen erhellen, darunter auch die, welche Erbsequenzen die Ausdifferenzierung von Nervenzellen bestimmen und wie sie vorgeben, dass und wie solche Zellen zusammen ein Zentralnervensystem organisieren. Solche Erkenntnisse sind nicht nur vom Vergleich mit anderen Primaten oder uns näher verwandten anderen Tieren zu erwarten. Auch die vielen Studien an Taufliegen, Fadenwürmern, Hefe und selbst an Pflanzen werden viele Einsichten darüber bringen, was den Menschen ausmacht.

Besonders interessieren in dem Zusammenhang die Entwicklungsgene – und hier insbesondere die homöotischen Gene mit ihren charakteristischen Sequenzen –, die den Bauplan des Körpers und des Zentralnervensystems kontrollieren. Die meisten dieser Gene haben einen sehr alten Ursprung: Sie unterscheiden sich bei Insekten und Wirbeltieren nicht sehr. Der Vergleich des menschlichen Genoms mit dem der Insekten deutet an, dass nur sieben Prozent der Genfamilien von Wirbeltieren allein bei dieser Tiergruppe vorkommen. Davon wirken wahrscheinlich nur zwölf Prozent an der Entstehung des Gehirns mit.

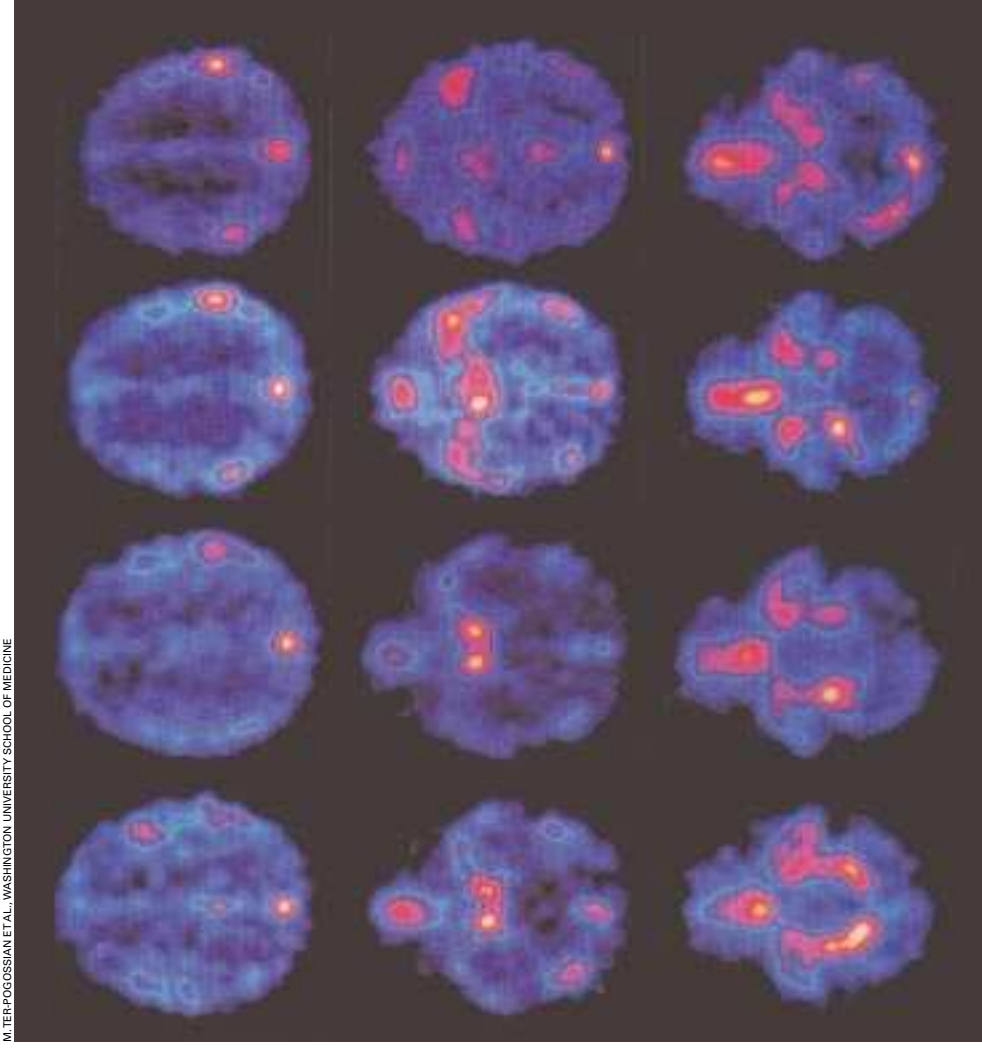
Millionen Synapsen pro Minute

Sogar von den Genen, die in mutierter Form beim Menschen neurologische Störungen hervorrufen, besitzen viele eine Entsprechung bei Fliegen. Zu nennen wären etwa das Tay-Sachs-Syndrom (ein Enzymdefekt, an dem Kinder mit wenigen Jahren sterben), die Duchenne-Muskeldystrophie, und auch Formen geistiger Behinderung, die mit Fehlern auf dem X-Chromosom zusammenhängen. Manche solcher Risiko-Gene haben sogar nahe Verwandte bei der Hefe. Das betrifft etwa das Gen, welches die amyotrophe Lateralsklerose verursacht, eine Erkrankung, bei der motorische Gehirnkerne degenerieren.

So viel Einfluss die 40 000 Gene des Menschen haben – sie bestimmen uns längst nicht allein. Auch Gedächtnisspuren prägen das Gehirn dauerhaft. Der Mensch hebt sich durch seine Lernbegabung ganz besonders hervor. Schon darum variiert das Gehirn im Detail von Mensch zu Mensch erheblich, ohne dass dies genetische Ursachen hätte. Das betrifft die Größe der einzelnen Regionen der Hirnrinde genauso wie die neuronalen Verknüpfungen. Zu den Hauptforschungsgebieten der Neurowissenschaften gehören Studien über den Zusammenhang von Genen, Lernen und dieser Variabilität.

Im Großen und Ganzen entstehen der Aufbau und die neuronalen Bahnen des Gehirns bereits im Mutterleib. Doch neue Nervenzellkontakte bilden sich zeitlebens in großer Zahl, und die Ausstattung verändert sich während des ganzen Lebens fortwährend. Bei der Geburt, die mitten in der Phase intensivsten Wachstums liegt, ist erst gut die Hälfte der Abermilliarden Kontakte des Erwachsenen vorhanden. Beim Ungeborenen und beim Säugling entstehen jede Minute an die zwei Millionen neue Synapsen. Später folgt eine Phase etwas langsamerer gleichmäßiger Entwicklung, die bis zur Pubertät anhält. Danach verringert sich das Tempo auf einen Wert, der während des Erwachsenenalters gleich bleibt. Erst im hohen Alter nimmt die Synapsenbildung plötzlich deutlich ab.

Wachstum und Rückbildung der neuronalen Kontakte scheinen sich während des gesamten Lebens in einem Gleichgewicht zu befinden. Dass für Wachstum und Stabilisierung der Neuronenfortsätze bestimmte chemische Faktoren nötig sind, erkannte die italienische Entwicklungsbiologin Rita Levi-Montalcini in den ▷



M. TER-POGOSSIAN ET AL., WASHINGTON UNIVERSITY SCHOOL OF MEDICINE

Diese Bilderserie gehört zu den ersten Aufnahmen rascher Veränderungen des Blutvolumens im Hirn mit der Positronen-Emissionstomografie. Rot stellen sich die augenblicklich stark durchbluteten Bereiche dar.

▷ 1960er Jahren. Zusammen mit dem amerikanischen Biochemiker Stanley Cohen erhielt sie dafür 1986 den Nobelpreis für Physiologie und Medizin. In jener Phase wiesen David Hubel und Torsten Wiesel – Nobelpreisträger für Physiologie oder Medizin von 1981 – nach, wie sehr Erfahrung die Neuronennetze des visuellen Systems formt: Störungen der Sehfunktionen in der Kindheit hinterlassen oft irreversible Spuren.

Folglich geben bei der Gehirnausbildung die genetischen Mechanismen eher den Rahmen vor, in dem die Entwicklung abläuft. Wie sich das Gehirn im Einzelnen ausdifferenziert, geschieht weitgehend nach epigenetischen Regeln, also durch Wechselwirkungen, Vorgaben, Anstöße, Zwänge von innen wie außen. Die Synapsenmuster während der Embryonalentwicklung und auch nach der Geburt dürften nach dem Prinzip »zufällige Variation und selektive Stabilisierung« entstehen. Lernen und Erfahrung überlagern somit die Wirkung der Gene. Die Bedeutung einer Epigenese für die Gehirnentwicklung haben Philippe Courège, Antoine Danchin und ich schon 1973 postuliert. Nimmt man Prozesse dieser Art an, lassen sich die Unterschiede zwischen Individuen, die Mechanismen der Gedächtnisbildung und der Umgang mit Wissen besser verstehen. Auch vermag man hiermit eher zu erklären, wie wir Kenntnisse erwerben, prüfen und weitergeben, kurz: wie wir Kultur schaffen.

Auf einem anderen Gebiet haben in den letzten Jahren zwei völlig unterschiedlich orientierte Forschungsrichtungen zusammengefunden, die einander früher meist geflissentlich ignorierten: auf der einen Seite die neurowissenschaftliche Gehirnforschung, auf der anderen Verhaltenswissenschaften wie insbesondere die Psychologie. Zwar untersuchen beide letztlich Gehirnleistungen, jedoch bisher mit ganz unterschiedlichen Herangehensweisen.

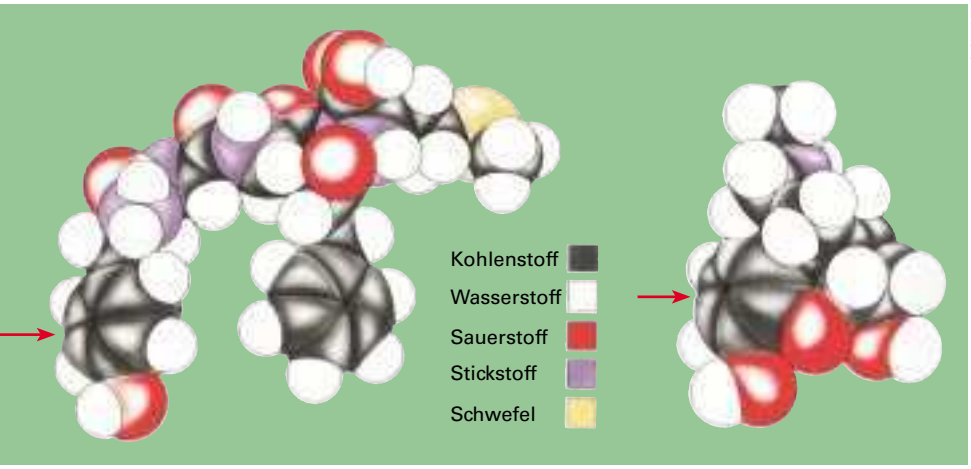
Neue Ansätze könnten die Kluft überbrücken. Erste Bemühungen, komplexes Verhalten auf die Aktivität einzelner Gehirngebiete zu beziehen, liegen lange zurück. Der französische Chirurg Paul Broca (1824–1880) lokalisierte bereits in den 1860er Jahren am Gehirn eines Verstorbenen das motorische Sprachzentrum, das bei diesem Patienten ausgefallen war. Solche Studien beschränkten sich jedoch lange auf Defekte, die auf eine Hirnverletzung oder Krankheit zurückgingen.

Das Denken von Schnecken und Fliegen

Dies änderte sich, als Neurochirurgen in den 1940er und 1950er Jahren während Gehirnoperationen einzelne Stellen der Hirnrinde elektrisch reizten. Sie prüften die Reaktionen und Gefühlserlebnisse der wachen Patienten (das Gehirn ist schmerzunempfindlich), damit sie bei dem medizinisch notwendigen Eingriff wichtige Gebiete verschonten. Daraus entstand eine immer genauere Gehirnkarte der verschiedenen Hirnfunktionen.

Aber auch dieser Ansatz brachte nur eingeschränkte Erkenntnisse. Erst die modernen bildgebenden Verfahren, die aktive Gebiete direkt aufzeigen, bedeuteten einen großen Schritt voran. Sie liefern wirklich einen Blick auf aktuelle Funktionszustände des Hirns. Mehrere Methoden mit jeweils anderen Vorteilen stehen zur Verfügung. Die Positronen-Emissionstomografie etwa zeichnet den Grad der Durchblutung auf, der mit der Hirnaktivität korreliert. Da diese Technik eine hohe zeitliche Auflösung ermöglicht, kann man dem Gehirn praktisch bei der Arbeit zusehen. Die Magnetresonanztomografie wiederum ermöglicht eine bessere räumliche Auflösung. Solche Bildgebungsverfahren, ergänzt um Methoden der Elektrophysiologie – also die direkte Messung der elektrischen Aktivität – werden es künftig erlauben, die Tätigkeit des gesamten Gehirns in Echtzeit zu verfolgen.

Kognitionsforscher können sich nun damit befassen, die Aktivität von genau umgrenzten



S. SNYDER

Der körpereigene Botenstoff Methionin (links) besitzt eine ähnliche Bindungsstelle wie Morphin (rechts; roter Pfeil). Viele Drogen binden sich im Gehirn an körpereigene Rezeptoren.

Hirnregionen auf Verhaltensleistungen und sogar auf mentale Zustände zu beziehen. Sie bemühen sich recht erfolgreich, neuronale Grundlagen von Emotionen, vom Wach- und Schlafzustand, von Lernen und Rechnen aufzudecken. Neuerdings gibt es auch Studien zur bewussten und unbewussten Verarbeitung von unterschwelligen Bildern.

Ebenso sensationell sind die Fortschritte der Elektrophysiologie. Bahnbrechend war schon, dass es gelang, am wachen Tier die Aktivität einzelner Neuronen zu verfolgen. Inzwischen kann man sogar das Verhalten ganzer Zellpopulationen gleichzeitig messen, Veränderungen über die Zeit verfolgen und Wechselbeziehungen zwischen den Zellen erfassen. Neurophysiologen und Molekularbiologen arbeiten intensiv an den Spuren von Verhalten und Gedächtnis auf Zell- und Molekülebene. An niederen Tieren, etwa Meeresschnecken und Fliegen, haben sie bereits grundlegende molekulare Mechanismen des Gedächtnisses aufgeklärt. Genetisch veränderte Tiere – meist Mäuse – ermöglichen herauszufinden, wie Moleküle, das Zellgeschehen und das Verhalten des Tiers, zum Beispiel sein Lernverhalten, zusammenhängen.

Eine Gehirnforschung, die dermaßen viele Disziplinen einschließt, erfordert ein solides Theoriewerk. Auch dort sind die Fortschritte beachtlich: Die Theorien über die neuronalen Korrelate des Bewusstseins diskutiert die Wissenschaftlergemeinschaft bereits eingehend. Das heißt jedoch keineswegs, dass wir die Komplexität des Gehirns bald verstehen werden. Wir sind immer noch weit davon entfernt, seine Fähigkeit zur Selbstorganisation und zur Erinnerung zu begreifen.

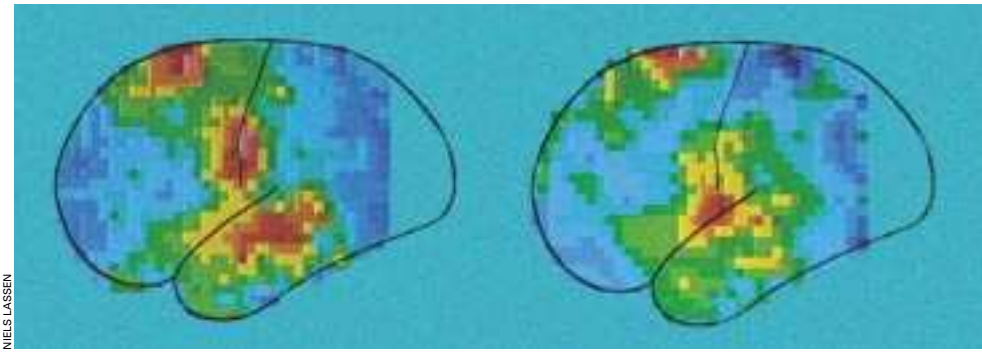
Rätselhafte Hirnkrankheiten

Die vielen neuen Ansätze der Hirnforschung zahlen sich immer mehr auch bei der Enträtselung und Bekämpfung der zahlreichen Krankheiten aus, die das Zentralnervensystem betreffen. Beispielsweise haben die bildgebenden Verfahren erhellt, wie manche Symptome bei Schizophrenie, Depressionen, der Alzheimer- oder der Parkinson-Krankheit zu Stande kommen. Ebenso wichtig sind für die Medizin die genetischen Erkenntnisse der letzten Jahrzehnte. Zunehmend spüren Forscher Veranlagungen auf, die für erbliche Krankheiten des Nervensystems prädisponieren.

Die Kenntnis der Hintergründe solcher Erkrankungen und Veranlagungen ermöglicht zugleich, auch molekulare Ziele zu bestimmen, an denen therapeutische Substanzen angreifen könnten. Solche Studien vereinen oft verschiedenste Methoden. Dabei können die bildgebenden Verfahren aufzeigen, welche Neuronengruppen oder Hirnstrukturen nicht ordnungsgemäß arbeiten. An genetischer Front suchen Forscher nach Gendefekten, die zu Krankheiten des Gehirns führen können. Sie haben etwa das Gen charakterisiert, das bei Chorea Huntington, dem Veitstanz, mutiert ist. Und sie konnten vier Gene identifizieren, die ein Alzheimer-Risiko bedeuten. Auch bei Autismus, Schizophrenie oder Depression muss es Veranlagungen geben, und dazu existiert bereits mancher konkrete Verdacht, aber noch sind die Ergebnisse nicht sicher. So bemerkenswert diese Befunde erscheinen, muss man doch auch betonen, dass die Ursachen einer Reihe von Gehirnerkrankungen noch nicht fassbar sind. Leider stehen auch für manche besser verstandenen Krankheiten nicht immer Gegenmittel zur Verfügung. Dies betrifft vor allem auch die neurodegenerativen Defekte, die immer mehr Menschen heimsuchen.

In den letzten Jahrzehnten hat die Hirnforschung auf molekularer und auf Zellebene enorme Fortschritte erzielt. Neurowissenschaftler beginnen nun das Verhalten von Nervenzellen, Synapsen und sogar Zellverbänden zu begreifen. Auf der anderen Seite wird es nun möglich, die Funktionsweise des gesamten Gehirns zu untersuchen. Die beiden Bereiche trennt jedoch ein weites unbekanntes Feld. Die Brücke hinüber zum Denken und Bewusstsein zu schlagen wird sehr schwierig sein. Manche werden es dennoch bald wagen.

Sollte ich zwei Gebiete angeben, welche die Neurowissenschaften in den kommenden 25 Jahren besonders herausfordern werden, fallen mir als Erstes Sprache und bewusstes Denken ein. Als Zweites kommt mir aber sogleich eine Forschungsrichtung in den Sinn, die ich »Neurosoziologie« nennen möchte. Damit meine ich die neuronalen Grundlagen von zwischenmenschlichen Beziehungen und Bindungen, aber auch den Zusammenhalt von sozialen Gemeinschaften und größeren Gruppierungen. Stellt das Zentralnervensystem ein Netz aus unzähligen verkoppelten Neuronen dar, so ist die Gesellschaft ein Netz aus unzähligen eng aufeinander bezogenen Gehirnen. Die Forschung darf nicht beim Gehirn stehen bleiben. Sie muss überleiten zur Funktionsweise der Gesellschaft. ◁



NIELS LASSEN

Diese Aufnahmen galten vor einigen Jahrzehnten als Sensation. Sie zeigen mittels radioaktiver Substanzen die Aktivität der Hirnrinde beim Sprechen.

Der Autor **Jean-Pierre Changeux** ist Professor am Collège de France in Paris. Am Pariser Institut Pasteur leitet er das »Laboratoire récepteurs et cognition«.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Lernen. Gehirnforschung und die Schule des Lebens. Von Manfred Spitzer. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2002.

Ich fühle, also bin ich. Die Entschlüsselung des Bewusstseins. Von Antonio R. Damasio. List, München 2001.

Rätsel Gehirn. Spektrum der Wissenschaft, Digest 2/2001.

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Schmutzige

Von Michael A. Levi und Henry C. Kelly

Feuerwehr, Notärzte und Polizei sind rasch am Einsatzort. In einer Lagerhalle hat es eine Explosion gegeben. Das Gebäude brennt lichterloh. In das gleißende Licht der Feuersbrunst mischt sich das nervöse Blinken der Einsatzfahrzeuge, das Heulen von Martinshörnern kündigt Verstärkung an. Feuerwehrleute haben bereits die ersten Schläuche ausgerollt und armdicke Wasserstrahlen auf den Brandherd gerichtet.

Unvermittelt leuchtet in einem der Feuerwehrwagen eine Warnlampe auf. »He! Die Strahlungsdetektoren geben Alarm!«, ruft ein verblüffter Brandmeister. »Es könnte eine schmutzige Bombe sein.« Der Einsatzleiter ruft seine Leute sofort zurück. Was wie ein Routineeinsatz aussah, entpuppt sich schließlich als Terroranschlag mit einer radiologischen Waffe.

Über Funk alarmiert, schicken die Katastrophenschutzbehörden speziell ausgebildete Strahlenschutztrupps. Polizisten mit Gasmasken versuchen, Anwohner in Sicherheit zu bringen. Die meisten der erschreckten Zuschauer fliehen bereits in Panik; sie halten sich Taschentücher vor den Mund.

Blown in the Wind: **Die größte Gefahr einer schmutzigen Bombe geht nicht von der Explosion selbst aus, sondern von den radioaktiven Teilchen, die in die Luft geschleudert werden.**

Bomben als Terrorwaffe

Radioaktiver Staub treibt durch die Stadt, Menschen fliehen in Panik, kostspielige Säuberungen sind notwendig, Krebserkrankungen steigen an – ein solches Szenario könnte Wirklichkeit werden, wenn Terroristen Anschläge mit radiologischen Waffen verüben.

CATHERINE MCINTYRE

Die Rauch- und Staubschwaden, die von der brennenden Halle aufsteigen, führen radioaktives Caesium mit sich. Vom Wind getrieben, entlädt die Wolke ihre unsichtbare radioaktive Fracht über weite Bereiche des Stadtviertels. Der Fall-out schlägt sich auf Gebäude, Bürgersteige, Straßen und Autos nieder. Die Klimaanlagen in den umgebenden Bürogebäuden saugen den feinen Staub an, viele Menschen atmen winzige Krebs erregende Teilchen ein.

Nach der panikartigen Flucht gleicht die Gegend einer Geisterstadt. Der Zutritt ist verboten. Nach einiger Zeit kommen Trupps in Schutzanzügen, saugen den Staub von den Straßen, spritzen mit Hochdruckstrahlern alle Außenwände der Gebäude ab und reinigen ebenso akribisch alle Innenräume. Im Nachhinein betrachtet hatte der Vorfall relativ wenige Verletzte zur Folge; die meisten wurden Opfer von Verkehrsunfällen auf der panikartigen Flucht. Doch die Bewohner sind verängstigt, weigern sich lange, zurückzukehren. Einige der Gebäude nahe des Explosionsortes müssen abgerissen werden, die benachbarten Häuser stehen leer. Der materielle Schaden geht in die Milliarden.

Ein solches Szenario mag manchem abwegig erscheinen, doch könnte es in nicht zu ferner Zukunft durchaus Realität werden. Schutz vor radiologischen Waffen, so genannten schmutzigen Bomben, ist bittere Notwendigkeit geworden. Die Komponenten und das erforderliche Know-how zum Bau einer solchen Terrorwaffe sind vorhanden, und es gibt Fanatiker, die genau dies bewerkstelligen könnten. So verhafteten die US-Behörden im Mai 2002 auf dem Flughafen Chicago den El-Kaida-Sympathisanten José Padilla. Der US-Bürger, der sich seit seiner Konversion zum Islam auch Abdullah al Muhadschir nennt, wird verdächtigt, den Bau und den Einsatz einer schmutzigen Bombe geplant zu haben.

Üblicherweise versteht man unter einer radiologischen Waffe eine relativ simple Vorrichtung aus konventionellen Sprengstoffen – wie etwa TNT oder eine Mischung aus Kunstdünger und Heizöl –, die mit hochradioaktiven Substanzen versetzt sind. Die freigesetzte Sprengenergie verdampft das radioaktive Material, das sich an die Staub- und Trümmerteilchen bindet und mit diesen in die Umgebung geschleudert wird.

Auch wenn radiologische Bomben nicht gerade als hochtechnologisches Produkt gelten und keineswegs mit Atomwaffen vergleichbar sind, können sie doch immensen Schaden anrichten: Sie nutzen die Angst der Bevölkerung vor radioaktiver Strahlung, die man nicht sehen und nicht spüren kann. Die Wirkung wäre demnach vor allem psychologischer Natur: Nicht die massenweise Vernichtung von Menschenleben wäre die Folge, sondern eher eine Massenpanik. Indem solche Waffen ein großes Areal verseuchen und damit für lange Zeit unzugänglich machen, können sie wirtschaftliche Katastrophen auslösen. Bis- ▷

▷ lang wurden radiologische Bomben nie eingesetzt, weil sie kaum einen militärischen Zweck erfüllen können: Den Ausgang eines Gefechts vermögen sie nicht zu beeinflussen, denn ihre Wirkung tritt nur verzögert und in nicht vorhersehbarer Weise ein.

Trotz des einfachen Prinzips wären radiologische Waffen recht schwierig zu bauen und einzusetzen. Es reichte nicht, gestohlenes Nuklearmaterial um eine Dynamitstange zu wickeln. Die groben Trümmer, die eine derartige Höllenmaschine in kleinem Umkreis verstreuen würde, wären schnell aufgelesen. Um eine große Wirkung zu erzielen, müsste der Bombenbastler über beträchtliche Kenntnisse und Fertigkeiten verfügen. Allerdings wäre der Aufwand weitaus geringer als für den Bau einer Atomwaffe. Vor dem Risiko, sich selbst zu verstrahlen, würde ein Selbstmordattentäter wohl kaum zurückschrecken, denn bevor er an einer tödlichen Strahlungsdosis zu Grunde ginge, könnte er seinen Anschlag längst begangen haben.

Hochradioaktive Materialien finden sich in Hunderten medizinischer, industrieller und wissenschaftlicher Apparaturen und Anlagen. Allein in den USA gibt es etwa zwei Millionen Quellen ionisierender Strahlung; tausende haben eine beachtliche Größe. Sie werden eingesetzt zum Abtöten von Keimen in Lebensmitteln, zur Sterilisierung pharmazeutischer Produkte, zum Vernichten von Krebszellen, zur Kontrolle von Schweißnähten, zur Erdölsuche und zu Forschungszwecken in Kernphysik und -technik. In den 1960er und 1970er Jahren förderte die US-Regierung die Anwendung von Plutonium-Isotopen in der Forschung. Ein Großteil dieses Materials befindet sich noch irgendwo, da die Regierung die Kosten für die Rückholung nicht aufbringen wollte.

Strahlen-Gau durch Quellen-Klau

Manche radioaktive Materialien wie Kobalt-60, Caesium-137 und Iridium-192 emittieren Gammastrahlen; andere wie Americum-241 und Plutonium-238 senden Alphateilchen aus. Da diese Substanzen sehr teuer sind, nahmen die Behörden stets an, die Besitzer würden aus wirtschaftlichen Erwägungen heraus geeignete Vorkehrungen gegen Diebstahl treffen. Und von Seiten der Politik hielt man einen besonderen Schutz dieser Substanzen nicht für notwendig, da man sich nicht vorstellen konnte, warum sich jemand bewusst dem Risiko einer Verstrahlung aussetzen sollte.

Die Wirklichkeit sieht jedoch anders aus. Sowohl in den USA als auch in Europa tauchten herrenlose Strahlenquellen auf – auf Schrottplätzen, in Fahrzeugen und in Gebäuden. Und das in Mengen, die sich durchaus für den Bau einer schmutzigen Bombe eignen würden. Allein in den USA sind seit 1996 fast 1500 Geräte oder Komponenten, die radioaktive Materialien enthalten, aus Firmen oder Forschungseinrichtungen abhanden gekommen. Dies berichtet eine neuere Studie der US-Atomaufsichtsbehörde, der *Nuclear Regulatory Commission* (NRC). Die Hälfte dieser Quellen wurde nie wieder gefunden. Im vergangenen Jahr fand sich eine Strahlenquelle in dem Schrott, der bei einer Stahlfirma angeliefert wurde. Einige Jahre zuvor rutschte radioaktives Caesium unentdeckt in eine Wiederverwertungsanlage, wurde dort eingeschmolzen und landete schließlich in Stahlträgern für den Betonbau.

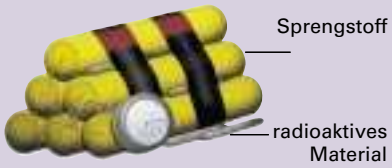
Die Internationale Atomenergiebehörde in Wien berichtete im Juni 2002, fast in jedem Staat der Erde sei das zum Bau einer schmutzigen Bombe notwendige radioaktive Material vorhanden. In mehr als hundert Ländern sei die Aufsicht jedoch zu mangelhaft, um einen Diebstahl dieser Stoffe verhindern zu können.

Beispiele belegen dies. In Georgien etwa wurden Ende 2001 zwei Arbeiter verstrahlt, als sie im Wald eine tragbare Radioisotopenbatterie mit Strontium-90 fanden und als Heizquelle nutzten. Tschetschenische Rebellen verbreiteten 1995 Angst und Schrecken, als sie einen abgeschirmten Behälter mit Caesium-137 (das aus Apparaturen zur Krebsbehandlung stammte) in einem Moskauer Park deponierten und anschließend russische Reporter auf den Standort hinwiesen. Acht Jahre zuvor brachen Schrottjäger in eine aufgegebene Krebsklinik in Goiânia (Brasilien) ein und stahlen ein medizinisches Gerät, das ebenfalls Caesium-137 enthielt. Etwa 250 Menschen wurden dieser Quelle ausgesetzt; acht von ihnen erkrankten an der Strahlenkrankheit, vier starben daran. Dieser Vorfall hatte 3500 Kubikmeter radioaktiven Abfall zur Folge – ausreichend, um ein Fußballfeld hüfthoch zu bedecken – und ruinierte die lokale Wirtschaft. Im Juli 2001 entwendete ein Arbeiter aus der stillgelegten Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) eine plutoniumhaltige Substanz. In einem Bericht des baden-württembergischen Umweltministeriums heißt es dazu: »Das vorliegende kriminelle Täterszenario wurde bisher der Sicherungsauslegung der WAK nicht zu Grunde gelegt.«

Neben akuten gesundheitlichen Beeinträchtigungen und Schäden wie der Strahlenkrankheit können radioaktive Substanzen Krebs verursachen. Dabei ist es schwierig, bestimmte Schäden einer bestimmten Dosis zuzuordnen, denn die Auswirkun-

Was schmutzige Bomben von Atomwaffen unterscheidet

Eine radiologische Waffe oder schmutzige Bombe ist ein relativ primitiver Sprengsatz aus TNT oder anderen konventionellen Sprengstoffen, die mit radioaktiven Substanzen vermischt sind. Die Detonation verdampft oder versprüht das radioaktive Material, das sich fein verteilt in der Luft ausbreitet.



Eine Atombombe (genauer: eine Kernspaltungswaffe) beruht auf einem wesentlich komplexeren Mechanismus, einer nuklearen Kettenreaktion in Uran-235 oder Plutonium-239. Dazu muss rasch eine überkritische Masse des Spaltmaterials zusammengefügt werden. In diesem Beispiel einer Implosionsanordnung erzeugt die Detonation eines ringförmig angeordneten konventionellen Sprengstoffs eine Stoßwelle, die pyramidenförmige Stücke aus Plutonium nach innen treibt. Im Zentrum treffen sie auf ein Gemisch aus Beryllium und Polonium, das die für das Auslösen der Kettenreaktion erforderlichen Neutronen erzeugt. Die nachfolgenden Spaltreaktionen setzen um mehrere Größenordnungen mehr Energie frei als ein konventioneller Sprengsatz und erzeugen zusätzliche Wirkungen wie zum Beispiel Röntgenstrahlung und Neutronenstrahlung.

SARA CHEN

gen auf die Gesundheit sind nicht immer eindeutig.

Da die verschiedenen Strahlungsarten Körpergewebe unterschiedlich stark schädigen, ist zu unterscheiden zwischen der rein physikalischen Strahlungsdosis (die pro Masseeinheit aufgenommene Energie der ionisierenden Strahlung) und der biologisch bedeutsamen Äquivalentdosis (die zusätzlich mit einer dimensionslosen Zahl, der radiobiologischen Wirksamkeit, gewichtet wird). Die Äquivalentdosis wird in Sievert gemessen. Gelegentlich ist auch noch die veraltete Einheit Rem in Gebrauch (mit der Umrechnung 1 Sievert = 100 Rem). Zum Gesamtrisiko einer exponierten Person wiederum tragen die verschiedenen Körpergewebe mit unterschiedlichen Anteilen bei. Dieses Gesamtrisiko wird durch die effektive Dosis angegeben, deren Maßeinheit ebenfalls das Sievert ist.

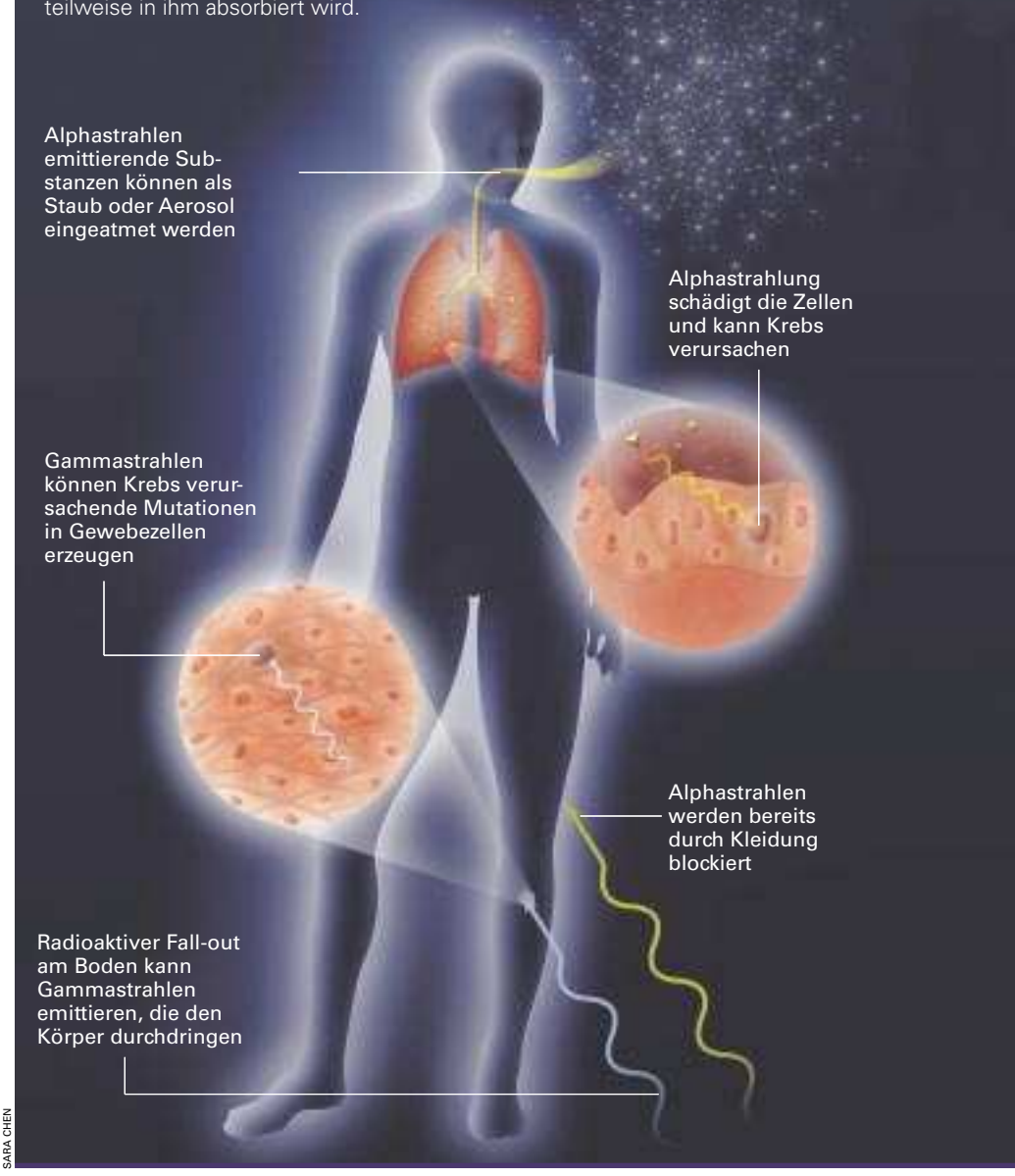
Rechnen mit »Hotspot«

Durch die natürliche Strahlenbelastung in Deutschland erhält jede Person pro Jahr im Mittel eine effektive Dosis von etwa 0,002 Sievert. Im Allgemeinen entwickelt sich bei Personen, die 1 Sievert oder mehr ausgesetzt waren, die Strahlenkrankheit, die eine sofortige medizinische Behandlung erforderlich macht. Die Hälfte aller Menschen mit einer Dosis von 4,5 Sievert stirbt in den nachfolgenden sechzig Tagen. Doch auch kleine Dosen können das Krebsrisiko steigern. Im Durchschnitt wird von 2500 Personen, die 0,01 Sievert ausgesetzt waren, eine Person an dem dadurch verursachten Krebs sterben.

Wissenschaftler und Behördenvertreter diskutieren seit langem, welche Strahlungsmenge noch hinnehmbar ist. Nach den rechtlichen Bestimmungen in Deutschland dürfen beruflich strahlenexponierte Personen nicht mehr als 0,02 Sievert pro Jahr erhalten. Die Umweltschutzbehörde der USA (*Environmental Protection Agency*, EPA) empfiehlt, kontaminierte Gebiete zu verlassen, wenn trotz ihrer Säuberung mit mehr als einem zusätzlichen Krebstoten pro 10 000 Menschen gerechnet werden muss. Dieses zusätzliche Risiko entspricht etwa 25 Röntgenuntersuchungen des Brustkorbs im Laufe eines Lebens. Aber diese Empfehlungen und Richtlinien sind umstritten, weil es an zuverlässigen Statistiken fehlt, aus denen man den Zusammenhang zwischen niedrigen Strahlendosen und Krebsrisiko entnehmen könnte. Zurzeit vermuten die Experten, dass es keine gefahrlose Niedrigdosis gibt, und dass die Wahrscheinlichkeit, an Krebs zu erkranken, proportional mit der Höhe der Dosis zunimmt.

Strahlungswirkungen

Alphastrahlung ist eine Teilchenstrahlung, die kaum in die Haut eindringt. Hauptrisiko ist das Einatmen von Alphastrahlen emittierenden Substanzen mit der Luft, denn diese können sich dann in den Lungen festsetzen, wo sie das Gewebe schädigen und Tumoren verursachen.
Gammastrahlung ist elektromagnetische Strahlung, die den Körper durchdringt und teilweise in ihm absorbiert wird.



SARA CHEN

Um die möglichen Auswirkungen einer schmutzigen Bombe einschätzen zu können, untersuchten wir eine Reihe von Szenarien. Für mehrere denkbare Angriffssituationen betrachteten wir die hypothetische Verteilung des radioaktiven Materials und schätzten die Größe der Gebiete, die über gewisse Grenzwerte verstrahlt werden würden. Hierzu setzten wir das Programm »Hotspot« ein, das Wissenschaftler am Lawrence-Livermore-Nationallaboratorium in Kalifornien entwickelt hatten, um die Ausbreitung radioaktiver Partikel zu simulieren. Die Modellergebnisse kombinierten wir anschließend mit experimentellen und theoretischen Daten über die Strahlenwirkung und schätzten daraus die Gesundheitsrisiken und Kontaminierungsgrade ab.

Eine Reihe von Anfangsparametern beeinflusst die im Computer simulierte Ausbreitung, wie etwa die Art der Freisetzung, die Tageszeit, das Wetter und die Wind- ▷

NEUE BEDROHUNGSSZENARIEN

Nur verstärkte internationale Zusammenarbeit kann das Risiko mindern, dass zum Bau von Kernwaffen benötigtes Material in die Hände von Terroristen fällt.

Von Annette Schaper

Lange Zeit galt die Vorstellung, Terroristen könnten radiologische Waffen oder gar Kernwaffen einsetzen, als abwegig. Doch auch in dieser Hinsicht hat nach den Anschlägen vom 11. September 2001 ein Umdenken eingesetzt. Wer auf einen tief greifenden wirtschaftlichen Schaden oder eine möglichst hohe Zahl von Opfern aus ist, der würde wohl auch nicht vor einer radioaktiven Verseuchung großer Stadtgebiete oder gar der Zündung einer Atombombe zurückschrecken.

Vergleichsweise einfach wäre eine radiologische Waffe herzustellen. Aber auch ein primitiver Kernsprengkörper in der Hand von Terroristen ist denkbar. Eine solche Höllenmaschine wäre zwar groß, schwer und im technischen Sinne nicht besonders effektiv – aber ihre Zerstörungskraft könnte durchaus an diejenige der Hiroshima-Bombe heranreichen.

Für den Bau einer nuklearen Waffe bräuchten die Terroristen zunächst einmal viel Geld, ähnlich wie El Kaida. Sodann müssten sie eine Arbeitsgruppe aus gut ausgebildeten Physikern und Ingenieuren beauftragen, die Zündtechnik experimentell zu erproben. Dies würde mehrere Jahre beanspruchen sowie ein Versuchsgelände erfordern, auf dem konventionelle Explosionen in großer Zahl durchgeführt werden könnten. In dieser Phase würde noch kein hochangereichertes Uran als Spaltmaterial benötigt. Die Zündversuche könnten zunächst mit anderen, nicht waffentauglichen Materialien durchgeführt werden, wie zum Beispiel mit Natur-Uran.

Diese experimentelle Phase wäre nicht im Untergrund, sondern nur unter dem Schutz eines Staates durchzuführen. Denn die Zündversuche ließen sich nicht verbergen. Anders jedoch der nächste Schritt: Der Einbau von Spaltmaterial in den Kernsprengkörper wäre relativ unauffällig zu bewerkstelligen. Voraussetzung wäre lediglich, dass die Terroristen irgendwie in den Besitz von hochangereichertem Uran gekommen sind. (Plutonium eignet sich zwar ebenfalls als Spaltmaterial für eine Atombombe, doch sind die erforderliche Zündtechnik und die Handhabung des Materials viel komplizierter.)

Ob die Terrororganisation El Kaida bereits über diese Fähigkeiten zum Bau einer Kernwaffe verfügt, ist nicht genau bekannt. Immerhin hatte sie in Afghanistan lange genug Unterschlupf gefunden, um die Zündtechnik entwickeln zu können. Und Osama Bin Laden hat deutliches Interesse an Kernwaffen gezeigt: Es sei »eine religiöse Pflicht, sich diese Waffen zu verschaffen, und eine Sünde, es nicht zu versuchen«.

Letztlich hängt das Ausmaß der terroristischen Bedrohung mit Kernsprengkörpern oder radiologischen Waffen davon ab, wie leicht sich die nuklearen Materialien beschaffen ließen. Um das Risiko zu verringern, muss man also dort ansetzen, wo diese Substanzen lagern. Nach wie vor gibt vor allem die Situation in den Nachfolgestaaten der Sowjetunion Anlass zur Sorge. Dort sind noch nicht einmal die genauen Bestände bekannt. Auch sind viele Depots nur unzureichend gesichert. Nachweislich hat es mehrere Diebstahlversuche gegeben – insbesondere solche, an denen Bin Laden beteiligt war. Bereits Mitte der 1990er Jahre wurde festgestellt, dass waffentaugliches Nuklearmaterial tatsächlich verschwunden ist. 1998 bestätigten russische Regierungsbeamte, dass versucht worden sei, 18,5 Kilogramm hochangereichertes Uran aus einer Kernwaffenfabrik herauszuschmuggeln – eine Menge, die durchaus für einen Sprengkopf ausgereicht hätte. In diesem Fall wurden die Täter rechtzeitig gefasst. Doch wie viele Fälle sind unentdeckt ge-

Brisantes Material

Um die Vorräte an waffentauglichen Materialien abzurüsten, sind mehrere politische und technische Hürden zu überwinden. Der erste Schritt ist die Deklarierung von militärisch genutztem hochangereichertem Uran und Plutonium als Überschuss. Doch erst, wenn dieses Material unter IAEO-Aufsicht gestellt wird, entsteht eine politische Hemmschwelle gegen eine militärische Nutzung. Die endgültige Entsorgung oder die zivile Verwendung würde eine zusätzliche technische Hürde bieten.

Vorräte an hochangereichertem Uran und Plutonium (in Tonnen)

	für militärische Zwecke		als Überschuss deklariert		unter IAEO-Sicherungsmaßnahmen		schon entsorgt		in zivilem Besitz	
USA	635	47,5	174	52,5	10	2	0	0	5–10	4–5
Russland	470	100	500	34	0	0	96	0		30,3
Großbritannien	15	3,2	0	4,4	0	0,1	–	–	ca. 4	59,8
Frankreich	24	5	0	0	0	0	–	–	ca. 5	40,3
China	20	4	0	0	0	0	–	–		0
Indien	wenig	0,31	0	0	0	0	–	–		0,7
Pakistan	0,69	0,005	0	0	0	0	–	–		–
Israel	?	0,51	0	0	0	0	–	–		–
andere Staaten										59,4
gesamt	1165	160	674	91	10	2,1	96	0	16–22	195

ANNETTE SCHAPER; DATEN NACH: WWW.ISIS-ONLINE.ORG/SIPRI

US-ENERGIEMINISTERIUM

Mehrere hundert Holzkisten mit uranhaltigen Materialien lagern allein in Hanford (US-Bundesstaat Washington).

blieben? Haben Terroristen gar schon genügend Spaltmaterial für eine Kernwaffe zusammen? Auszuschließen ist das nicht.

Das Problem liegt vor allem in den Ursprungsländern. Doch weil sich die meisten keine aufwendigen Kontrollmaßnahmen leisten können, ist eine internationale Zusammenarbeit erforderlich. Vor allem in Russland ist der physische Schutz vieler Anlagen noch immer ungenügend. Die Gehälter der ehemals privilegierten Mitarbeiter können oft nicht mehr bezahlt werden – was manchen dazu verleiten könnte, für andere Auftraggeber tätig zu werden. Und trotz des fortschreitenden Abbaus der Kernwaffenarsenale nimmt das Inventar an Plutonium und hochangereichertem Uran nicht ab. Denn es werden zwar Sprengköpfe zerstört, das Spaltmaterial aber bleibt erhalten.

Die internationale Gemeinschaft leistet bereits Hilfe. Schon kurz nach Ende des Kalten Krieges initiierten die USA das *Cooperative Threat Reduction*-Programm (CTR). Mehrere Milliarden US-Dollar wurden bereits aufgewandt, um Kernsprengköpfe zu inventarisieren, sie weit von Konfliktherden entfernt zu lagern, ihre Unfallsicherheit zu verbessern oder sie zu zerstören. Auch werden Waffenkonstrukteure in anderen Projekten weiter beschäftigt oder sozial abgesichert, um zu verhindern, dass sie in Drittländer abwandern oder ihr Wissen weitergeben. Der Schutz, die Kontrolle und die Bilanzierung von kritischen Materialien werden verbessert und die Exporte sensitiver Technologien strenger geregelt.

Andere westliche Länder spezialisieren sich zumeist auf kleinere Projekte. Indes übersteigt die finanzielle Hilfe der Europäischen Union für den allgemeinen wirtschaftlichen Aufbau in Russland die Aufwendungen für die CTR-Aktivitäten bei weitem. Besonders fruchtbar ist die Zusammenarbeit bezüglich des Internationalen Technologiezentrums in Moskau. Die USA, Japan und die EU haben diese Einrichtung, die zivile Projekte für ehemalige Kernwaffenwissenschaftler fördert, von 1992 bis 2000 mit rund 500 Millionen US-Dollar unterstützt.

Dennoch ist die Gefahr, die von den in Russland lagernden Nuklearmaterialien ausgeht, noch nicht gebannt. Hinzu kommt, dass der physische Schutz solcher Materialien und die Sicherung von Nuklearanlagen weltweit sehr unterschiedlich gehandhabt werden. Manche Länder haben Terrorismus oder Sabotage noch nicht einmal in ihren Gefährdungskatalog aufgenommen. Kein internationales Abkommen verpflichtet Staaten, ihr waffentaugliches Material vor Diebstahl oder ihre Nuklearanlagen vor Sabotage zu schützen. Nur für internationale Transporte sind gewisse Vorkehrungen festgelegt.

In den letzten Jahren hat sich immer stärker die Erkenntnis durchgesetzt, dass verpflichtende Standards erarbeitet werden müssen. Die Vorschläge für einen verbesserten physischen Schutz, die eine von der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEO) eingesetzte Expertengruppe erarbeitete, sind derzeit Gegenstand internationaler Verhandlungen. Die IAEO führt zudem ein umfangreiches Programm zum Schutz gegen Nuklearterrorismus durch: Es umfasst zum Beispiel Trainingskurse und Arbeitstagungen, Datenbanken, Koordination technischer Unterstützungsprogramme und Hilfestellung bei der Umsetzung neuer Standards und Abkommen.

Allerdings ist der physische Schutz von Nuklearmaterial nur ein sicherheitsrelevanter Aspekt. Ebenso wichtig ist eine korrekte Bilanzierung des Materials, um Abzweigungen entdecken zu können. Hierfür gibt es internationale Standards, allerdings nur in Nichtkernwaffenstaaten, die Sicherungsmaßnahmen der IAEO unterliegen. In diesen Ländern wird der gesamte Brennstoffkreislauf regelmäßig kontrolliert. Diese Transparenz hat dafür gesorgt, dass die Bestände der Nuklearmaterialien in den Nichtkernwaffenstaaten sehr genau erfasst sind.

Leider fehlt eine vergleichbare Verpflichtung der Kernwaffenstaaten. Zwar werden Großbritannien und Frankreich regelmäßig von Euratom kontrolliert, doch gerade die Staaten mit den größten Beständen, USA und Russland, sind zu keinerlei Transparenz verpflichtet – ebenso wenig wie China und ebenso wenig wie Indien, Pakistan und Israel, die nicht Mitglied im Nichtverbreitungsvertrag sind. Darum ist nach wie vor unbekannt, wie viel Plutonium und hochangereichertes Uran weltweit vorhanden ist und wo es lagert. Man kann nur schätzen, dass es mindestens 450 Tonnen Plutonium und über 1700 Tonnen hochangereichertes Uran sind (siehe Tabelle). Tatsächlich hat eine Inventur des Plutoniums in den USA vor einigen Jahren einen Fehlbestand von über 2,5 Tonnen ergeben – eine Folge mangelnder Sorgfalt bei der Materialbuchhaltung.

Die internationale Gemeinschaft sollte sich deshalb nicht nur um weltweit verbindliche hohe Standards für den physischen Schutz von Nuklearmaterial bemühen, sondern auch um Transparenz der Bestände und Anlagen in den Kernwaffenstaaten und in den Ländern außerhalb des Nichtverbreitungsvertrags.

Annette Schaper ist promovierte Physikerin und Mitarbeiterin der Hessischen Stiftung Friedens- und Konfliktforschung in Frankfurt am Main.

Literaturhinweise

Die Rolle der Europäischen Union in der Abrüstung von russischen Massenvernichtungswaffen. Von Kathrin Höhl, Harald Müller und Annette Schaper. HSFK-Report, Nr. 10, 2002.

Bio- und Nuklearterrorismus. Eine kritische Analyse der Risiken nach dem 11. September 2001. Von Alexander Kelle und Annette Schaper. HSFK-Report, Nr. 10, 2001. (Erhältlich unter www.hsfk.de)

geschwindigkeit. Wind in höheren Luftschichten etwa verteilt Material über ein größeres Gebiet, vermindert dabei jedoch die lokale Kontamination. Um zu gewährleisten, dass unsere Ergebnisse aussagekräftig sind und nicht einfach die spezifischen Anfangsbedingungen widerspiegeln, spielten wir mehr als hundert Verbreitungsszenarien durch. Für eine gegebene radioaktive Quelle streuten unsere Resultate in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen höchstens um den Faktor zehn. Eine solche Fehlerbreite stellt unsere grundlegenden Schlussfolgerungen nicht in Frage – zumal sich die verschiedenen Faktoren teilweise gegenseitig aufheben. Für jeden Faktor, der die Auswirkungen einer Bombe halbieren könnte, findet sich ein anderer, der sie verdoppelt.

Wenn sich die Menschen in der Nähe des Explosionsortes nicht schnell genug in Sicherheit bringen können, atmen sie kleine Staubteilchen und Aerosole ein. Aus früheren Vorfällen wissen wir: Wenn diese Partikel Alphastrahler enthalten – wie Plutonium oder Americium –, setzen sich diese für Jahre in den Lungen der Opfer fest und führen zu einer lang anhaltenden Strahlenbelastung. Doch wenn sich das Einatmen von Staubschwaden vermeiden lässt und die Evakuierten rasch dekontaminiert werden, also ihre verseuchte Kleidung ablegen und ihre Haut gründlich waschen, bleibt die Gesamtbelastung minimal.

Der von einer radiologischen Bombe aufgewirbelte Staub bliebe für lange Zeit in den Rissen und Spalten der Gebäudefassaden, der Bürgersteige und Straßen haften. Zudem würde ein Teil in das Innere der Gebäude geweht. Einige der in Frage kommenden Substanzen wie etwa Caesium-137 verbinden sich chemisch mit Glas, Beton und Asphalt. So findet sich heute, mehr als 15 Jahre nach der Tschernobyl-Katastrophe von 1986, noch immer Caesium auf den Bürgersteigen vieler skandinavischer Städte, über die damals der radioaktive Fall-out hinwegzog. Glücklicherweise ist die dadurch verursachte Strahlenbelastung recht gering, sodass das Krebsrisiko um weniger als einen zusätzlichen Fall pro 10 000 Menschen gestiegen ist.

Wenn das Material Alphastrahler enthielte, würde das langfristige Gesundheitsrisiko durch Einatmen radioaktiven Staubes verursacht, der von Wind, Fahrzeugen oder Fußgängern hochgewirbelt würde. In Kiew beispielsweise, mehr als hundert Kilometer von Tschernobyl entfernt, enthält der Staub in den Straßen noch heute geringe Mengen an Plutonium. Durch dauerhafte Kontamination mit Caesium-137 oder anderen Gammastrahlern würde jede Person in der verseuchten Zone einer gewissen Strahlendosis ausgesetzt werden, denn anders als Alphastrahlen durchdringen Gammastrahlen Kleidung und Haut.

Verseuchte Städte

Betrachten wir als Beispiel die explosive Freisetzung von Caesium-137 mit einer Aktivität von $1{,}3 \times 10^{14}$ Becquerel (Zerfälle pro Sekunde). Quellen mit einer solchen Aktivitätsmenge sind in der ehemaligen Sowjetunion abhanden gekommen. Terroristen könnten damit allerdings nur schwer umgehen, weil sie sich gegen die Strahlung schützen müssten. Doch das Caesium läge bereits als Pulver vor, sodass eine effektive Verbreitung durch einen Sprengsatz relativ einfach wäre.

Die Explosion einer solchen Bombe im Südwesten von Manhattan in New York würde eine Fläche von rund 800 Quadratkilometern derart verseuchen, dass sie nach den strengen Richtlinien der EPA nicht mehr bewohnbar wäre. Die Katastrophe hätte zwar nicht das Ausmaß von Tschernobyl – die insgesamt freigesetzte Strahlung wäre geringer und gefährliche kurzlebige Isotope wie Iod-131 wären gar nicht vorhanden. Doch das Chaos und der Schrecken wären enorm. In einem Gebiet, das etwa zwanzig Straßenzüge umfasste, wäre für die dortigen Bewohner (ohne Dekontaminierung) innerhalb der nächsten dreißig Jahre mit einem zusätzlichen Krebstoten pro zehn Personen zu rechnen. Ein Areal von rund 15 Quadratkilometern müsste nach den Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission *(International Commission on Radiological Protection)* evakuiert werden. Selbst wenn diese Standards auf die in der Umgebung von Tschernobyl angewandten Werte gesenkt würden, wären noch immer etwa hundert Häuserblöcke unbewohnbar. Der materielle Schaden würde hunderte Milliarden US-Dollar betragen.

Für die Dekontaminierung solch großer Areale in einem Stadtgebiet gibt es keinen Präzedenzfall. Die bisherigen Erfahrungen beruhen im Wesentlichen auf kleinen Reinigungsaktionen in Unternehmen sowie auf den während des Kalten Krieges durchgeführten Studien über die Folgen eines Atomkrieges. Zunächst müssten sich die Reinigungstrupps darauf konzentrieren, radioaktive Staubteilchen von Oberflächen oder aus Spalten und Rissen zu entfernen. Dies könnte mit relativ kostengünstigen mechanischen Verfahren wie Absaugen und Absprühen geschehen. Dort, wo Radioaktivität in poröse Materialien eingedrungen ist, müsste die Oberfläche durch Sandstrahlen oder ähnlich aufwendige und teure Verfahren abgetragen werden. In manchen Fällen müsste der Belag von Bürgersteigen und Straßen gänzlich entfernt und entsorgt werden, ebenso wie die oberste Erdschicht

Sollte im Südwesten von Manhattan in New York eine mit radioaktivem Caesium geladene schmutzige Bombe detonieren, würde sich der Fall-out bei Südwestwind fast über den ganzen Stadtteil verteilen. Die radioaktive Verseuchung in den markierten Zonen würde ein Ausmaß ähnlich der am stärksten betroffenen Zonen um den Unglücksreaktor in Tschernobyl erreichen.

Die Explosion einer radiologischen Bombe hätte kostspielige Säuberungsaktionen zur Folge. Arbeiter in Schutzanzügen müssten feste Oberflächen mit Staubsaugern, Hochdruckstrahlern und Sandstrahlern vom Fall-out befreien und kontaminierte Pflanzen und Böden entfernen.

YUN JAI-HYOUNG, AP PHOTO

aus Grünanlagen und Gärten. Ein Großteil der Vegetation wäre wegzuschneiden. Mit Hilfe von Säuren und anderen Chemikalien müssten Rost und mineralische Ablagerungen entfernt werden, in die radioaktive Partikel eingedrungen sind.

Im Interesse der Machbarkeit könnte es auch notwendig werden, die Richtlinien über Strahlengrenzwerte – die für Situationen in Friedenszeiten entwickelt wurden – zu überdenken. Falls nicht wirklich ganze Stadtviertel aufgegeben werden sollten, müssten die Bewohner ein höheres Risiko in Kauf nehmen. Würde man etwa noch eine effektive Dosis von 0,05 Sievert über einen Zeitraum von fünfzig Jahren zulassen, so würde rein statistisch von 500 Personen eine Person zusätzlich an Krebs sterben. Dies entspräche einer Minderung der allgemeinen Lebenserwartung um etwa 15 Tage. Eine andere Möglichkeit wäre, all jene Gebiete zu säubern, die das Doppelte der normalen Hintergrundbelastung aufweisen.

Neuralgische Punkte überwachen

Um überhaupt die Bedrohung durch radiologische Waffen und – im Falle eines Falles – ihre Wirkungen zu mindern, könnten einige relativ kostengünstige Maßnahmen getroffen werden. In einem ersten Schritt wären die Substanzen selbst in geeigneter Weise zu sichern. In den USA verschärfen die Behörden gegenwärtig das Lizenzierungsverfahren, das den Zugang zu radioaktiven Substanzen und die Sicherheitsstandards für alle Gefahrenstoffe regelt. Häufige und sorgfältige Kontrollen wären unerlässlich. Ungenutzte Materialien könnten wieder unter Aufsicht gestellt werden durch Programme ähnlich dem *Off-Site Source Recovery Project* des Los-Alamos-Nationallaboratoriums, mit dem radioaktive Quellen aus Unternehmen, staatlichen Einrichtungen und Universitäten eingesammelt werden.

Auch sollten weniger riskante Technologien erforscht werden, wie etwa Ionenstrahlen, um radioaktive Quellen ersetzen zu können. Erhöhte Sicherheitsanforderungen werden den Gebrauch radioaktiven Materials verteuern und dadurch wirtschaftliche Anreize schaffen, nach alternativen Verfahren zu suchen.

In einem weiteren Schritt müssten wir unsere Fähigkeiten verbessern, entwendete radioaktive Materialien aufzuspüren. An neuralgischen Punkten wie Flughäfen, Häfen, Bahnhöfen, Tunneln, Autobahnen und Grenzübergängen müsste ein System von Strahlendetektoren aufgebaut werden. Die USA haben damit bereits begonnen: Entlang des Korridors Boston – New York – Washington und um die US-Bundeshauptstadt herum wurden Strahlenmessgeräte der *Nuclear Emergency Search Teams* installiert, die dem Energieministerium unterstehen. Routineprüfungen auf Schrott- und Müllhalden würden vor illegaler oder versehentlicher Ablagerung von Gefahrenstoffen schützen. Für diese Zwecke würden einfache Geigerzähler ausreichen. Denn alle Anlieferungen könnten an den wenigen Zufahrtsstellen kontrolliert werden. Zudem ist es unwahrscheinlich, dass jemand versuchen würde, speziell abgeschirmte Quellen in diese Anlagen hineinzuschmuggeln.

Selbstverständlich sollten die Behörden auf einen Anschlag mit radiologischen Waffen vorbereitet sein. Für eine effiziente Reaktion ist ein System erforderlich, mit dem sich das Ausmaß der Schäden rasch einschätzen lässt, das die zuständigen Stellen alarmiert, einen schlüssigen Maßnahmekatalog entwickelt und schnellstens die notwendigen Einsatzkräfte und Gerätschaften an den Ort des Geschehens bringt. Eine wissenschaftlich glaubwürdige Einzelperson sollte beauftragt werden, die Öffentlichkeit sachgerecht über den Anschlag zu informieren. Dies vermag Panikreaktionen und Angstgefühle der Bevölkerung besser in Grenzen zu halten als Stellungnahmen anonymer Behörden.

All das erfordert ausgiebiges Training. Angehörige von Rettungsdiensten und Krankenhäusern müssen wissen, wie sie sich selbst und betroffene Bürgerinnen und Bürger während eines radiologischen Angriffs schützen können. Des Weiteren müssen sie schnell feststellen können, ob eine Person verstrahlt wurde. Doch Unterricht und Kurse allein reichen nicht aus: Ein solches Programm braucht vor allem klare Handlungsstrategien.

Schließlich müssen wir lernen, wie große Stadtgebiete dekontaminiert werden können. Und wir müssen die notwendigen Schritte festlegen, mit denen eine Verseuchung so gering wie möglich gehalten wird. Letztlich könnte es von dieser Einsatzbereitschaft abhängen, ob nach einem Anschlag eine Geisterstadt zurückbleibt oder ob – nach wenigen Monaten der Säuberung – wieder ein funktionsfähiges Gemeinwesen aufgebaut werden kann. ◁

Michael A. Levi und **Henry C. Kelly** sind Physiker und bei der Federation of American Scientists (FAS) in der US-Bundeshauptstadt Washington tätig. Diese Forschungs- und Interessenorganisation beschäftigt sich mit Fragen aus Wissenschaft und Politik. Levi leitet das Strategic Security Project der FAS; seine Forschungen konzentrieren sich auf die nukleare Nichtverbreitung und auf Atomwaffenpolitik. Kelly ist Präsident der FAS. Von 1993 bis 2000 war er stellvertretender Direktor für Technologie im White House Office of Science and Technology. Die Autoren möchten Jaime Yassif (FAS) für ihre Recherche danken.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Making the Nation Safer: The Role of Science and Technology in Countering Terrorism. Vom Committee on Science and Technology. National Research Council, 2002.

Securing Nuclear Weapons and Materials: Seven Steps for Immediate Action. Von M. Bunn, J. Holdren und A. Weir. Harvard University Press, 2002.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

TECHNIK

Luftig-locker-leichter Lärmschlucker

Eine akustische Barriere, die für Licht und Luft durchlässig ist, haben Forscher an der Universidad Politécnica de Valencia entwickelt. Ähnlich mehreren Gartenzäunen, die versetzt hintereinander aufgestellt werden, ordneten sie ein Sortiment von drei Meter langen und 16 Zentimeter dicken PVC-Röhren derart an, dass sie ein regelmäßiges Gitter mit sechseckigen Waben bildeten. Das beeindruckende Ergebnis: Die leichtgewichtige Struktur von nur 1,1 Meter Dicke schluckt Lärm genauso effektiv wie die massiven Wände, die entlang von Autobahnen aufgestellt werden. Die Konstruktion nutzt den altbekannten Bragg-Effekt: Wenn Wellen auf ein periodisches Gitter stoßen, dessen Abstände der Wellenlänge entsprechen, löschen sie sich durch Interferenz teilweise aus. Die spanischen Wissenschaftler konnten ihr PVC-Gitter sogar noch optimieren, indem sie einige ausgewählte Röhren entfernten. Dadurch erzeugten sie ein Untergitter, das auch Lärm bei tiefen Frequenzen von 500 Hertz dämpft. *(Applied Physics Letters, Bd. 81, S. 5240)*

ASTRONOMIE

Sternenring um die Milchstraße

Erst jetzt haben unabhängig voneinander gleich zwei internationale Forschergruppen einen gigantischen Ring aus mehreren hundert Millionen Sternen entdeckt, der die Milchstraße umspannt. Wie ihre Beobachtungen am Teleskop des Apache-Point-Observatoriums in New Mexico und am Isaac-Newton-Teleskop auf den Kanarischen Inseln ergaben, liegt er fast verborgen hinter den Sternen in der Ebene der Galaxis. Mit einem Durchmesser von 120 000 Lichtjahren ist er um ein Fünftel größer als die galaktische Scheibe. Woher stammt er? Da er in derselben Ebene wie die Milchstraße liegt, besteht er möglicherweise aus Sternen, die sich im Laufe der Zeit aus unserer Galaxis gelöst haben. Das hohe Alter der vermessenen Sterne lässt aber auch eine andere Deutung zu. Möglicherweise gehörten sie zu einer kleinen Satellitengalaxie, die vor Jahrmilliarden der Milchstraße zu nahe kam und von ihr auseinander gerissen wurde. *(Rensselaer Polytechnic Institute und Universität Sydney)*

MILCHSTRAßENRING M/O LABELS.JPEG, GERAINT F. LEWIS, UNIVERSITY OF SYDNEY

▲ Veranschaulichung des neu entdeckten Rings um die Milchstraße

XING XU

ARCHÄOLOGIE

Tirolerhut aus der Bronzezeit

Den größten und zugleich vielfältigsten Schatzfund der Mittelbronzezeit in Mitteleuropa machten nach eigener Einschätzung nun Forscher der Universität Innsbruck und des österreichischen Bundesdenkmalamtes sowie Mitglieder des Vereins Archaeotirol im Tiroler Oberland (Bezirk Landeck). Zu den 360 Gegenständen, die der Schatz umfasst, gehören Schwerter, Dolche, Sicheln und Schmuck aus der Zeit zwischen 1550 und 1250 v. Chr. Es dürfte sich um eine Opfergabe handeln, die seitlich einer Felsspalte unter einem mächtigen Steinblock in einem Keramiktopf mehr als 3000 Jahre lang unentdeckt geblieben war. Ein völlig zerknittertes Bronzeblechfragment stellte sich als Teil eines Bronzehelms heraus. Wissenschaftler am Römisch-Germanischen Museum in Mainz konnten ihn restaurieren und in das 14. oder beginnende 13. Jahrhundert vor Christus datieren (Bild unten). Ähnlich alt ist in Europa sonst nur noch ein Helm aus Knossos auf Kreta. Beide unterscheiden sich jedoch deutlich im Typ. Deshalb scheint es auch unwahrscheinlich, dass das in Tirol gefundene Stück von Vorbildern im östlichen Mittelmeerraum inspiriert oder gar von dort importiert ist. Vielmehr sprechen alle Anzeichen dafür, dass das bronzezeitliche Mitteleuropa der kretisch-mykenischen Kultur in weiten technischen Bereichen ebenbürtig war. *(Der Standard, 13. 1. 2003)*

GERHARD TOMEDI, UNIVERSITÄT INNSBRUCK, INSTITUT FÜR UR- UND FRÜHGESCHICHTE

▶ Urform des Tirolerhuts? Dieser 3000 Jahre alte Helm wurde aus einem in Tirol entdeckten Bronzeblechfragment rekonstruiert.

PALÄONTOLOGIE

Urvogel mit vier Flügeln

PORTIA SLOAN

Microraptor gui heißt das neue Urgetier, dessen Entdeckung die Diskussion über den Ursprung des Vogelfluges neuerlich anfacht. Vor 124 bis 128 Millionen Jahren schwang sich der etwa 80 Zentimeter große Dinosaurier von Baum zu Baum. Die kräftig ausgebildeten Vorder- und Hintergliedmaßen des Theropoden waren anders als bei dem älteren *Archaeopteryx* komplett befiedert. Weit ausgebreitet bildeten sie so einen perfekten Gleitschirm. Zum aktiven Schlagen waren die vier Flügel jedoch noch nicht geeignet. Das zumindest vermuten Xing Xu und seine Mitarbeiter an der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in Peking, die gleich sechs Fossilien der baumlebenden Saurier in der Provinz Liaoning gefunden haben. Die Federn an den Hinterbeinen dürften für einen schnellen Start am Boden zu lang gewesen sein und wären dreckverklebt aerodynamisch unbrauchbar geworden. Damit stützt der neue Fund die Theorie, das Flugvermögen der Vögel habe sich aus dem Gleiten entwickelt. *(Nature, 23. 1. 2003, S. 335)*

◀ Das Fossil von *Microraptor gui* zeigt deutliche Spuren der Befiederung an allen vier Gliedmaßen.

BIOLOGIE

Komplexes Immunsystem in einfachem Meerestier

Als eine Art Urknall beschreibt der amerikanische Immunologe Charles Janeway in seinem bekannten Lehrbuch die Entstehung der erworbenen Immunantwort. Tatsächlich ist ein komplexes Immunsystem, in dem so genannte Effektorzellen mit Antikörpern und Botenstoffen gezielt gegen Eindringlinge und kranke Körperzellen vorgehen, bei allen Wirbeltieren bereits mit seinem vollen Funktionsspektrum vorhanden. Dagegen wurden bei Wirbellosen bisher nur Elemente einer simplen angeborenen Immunantwort gefunden – zum Beispiel Fresszellen, die Krankheitserreger einfach vertilgen. Doch jetzt entdeckten Wissenschaftler um Thomas Bosch vom Zoologischen Institut der Universität Kiel bei Manteltieren, kleinen festsitzenden Meeresbewohnern, ein überraschendes Bindeglied zur hoch entwickelten Körperabwehr der Wirbeltiere: Auf der Oberfläche von einigen Blutzellen der Seescheide *Botryllus schlosseri* fanden sie ein Molekül, das dem Rezeptor auf den hoch spezialisierten menschlichen Killerzellen sehr ähnlich ist. Demnach scheint die erworbene Immunantwort doch keine plötzliche Erfindung der Wirbeltiere zu sein, sondern das Ergebnis einer schrittweisen Evolution. *(Proceedings of the National Academy of Sciences, 21. 1. 2003, S. 622)*

OKAPIA

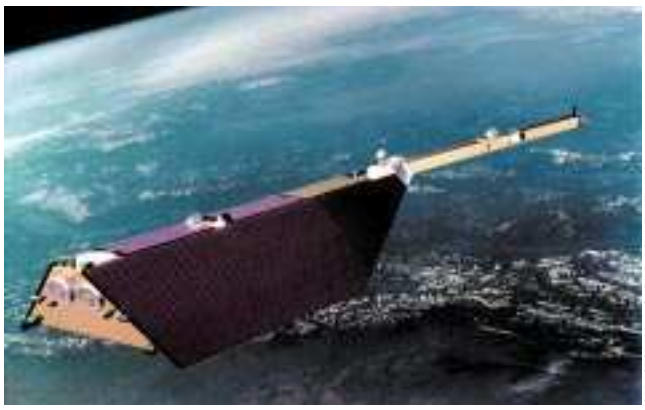
▲ Kolonie des Manteltieres *Botryllus schlosseri*

PHYSIK

Das Meer als Magnet

Schon seit längerem wurde vermutet, dass die Bewegung des elektrisch recht gut leitenden Meerwassers durch das Erdmagnetfeld ähnlich wie bei einem Dynamo elektrische Ströme in den Ozeanen induziert. Diese wiederum sollten sekundäre Magnetfelder erzeugen, die um vier bis fünf Größenordnungen kleiner sind als das Primärfeld. Wissenschaftlern am GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) ist es in Zusammenarbeit mit Forschern der Universität von Washington in Seattle nun erstmals gelungen, die extrem schwache magnetische Signatur der Gezeitenströmungen im Meer vom All aus zu beobachten – durch hochgenaue Messungen des GFZ-Forschungssatelliten Champ *(Challenging Minisatellite Payload)*. Damit können die Ozeansignale nun in geomagnetischen Feldmodellen berücksichtigt werden, was deren Genauigkeit erhöht. Außerdem eröffnet sich – ergänzend zu den bisherigen Radarmessungen – eine neue Möglichkeit, die dynamische Meereshöhe global zu beobachten. Mittelfristig ließen sich auch Meeresströmungen weltweit genauer verfolgen. *(Science, 10. 1. 2003, S. 239)*

▼ Der Geoforschungssatellit Champ registriert fünf Jahre lang alle Veränderungen des Erdmagnetfeldes.



GFZ POTSDAM, NASA BILDARCHIV T. ALTHAUS

Der Ursprung lag in Afrika

Zwar könnte in uns auch etwas Erbgut von Neandertalern stecken. Sie waren aber nicht die Ahnen der modernen Menschen. Diese stammen eindeutig aus Afrika.

Von Günter Bräuer

Der heftige Streit der Anthropologen um die geografischen Wurzeln des modernen Menschen hat die sachliche Ebene längst verlassen. In den zwei Jahrzehnten, die dieser Kampf tobt, haben sich die Lager nichts geschenkt. Erst jüngst verkündete der amerikanische Paläoanthropologe Milford Wolpoff, ein Hauptgegner des »Out-of-Africa-Modells«, dass er und seine Mitstreiter nie klein beigeben würden.

Dabei sprechen die Fakten immer klarer für diese These, wonach der moderne Mensch – der anatomisch moderne *Homo sapiens* – in Afrika entstand und sich erst später auf die anderen Kontinente ausbreitete, wo er die dortigen archaischen Menschenformen ablöste. Für die dazu konträre Ansicht, zu deren Begründern Wolpoff von der Universität von Michigan in Ann Arbor gehört, finden sich bei näherer Prüfung kaum stichhaltige Belege. Nach dieser Auffassung, »multiregionales Modell« genannt, geschah die Evolution zum modernen Menschen sowohl in Afrika als auch in Europa, Ostasien und Australasien, also in den verschiedenen Regionen, in denen Frühmenschen lebten. Die Vorfahren der Europäer wären dann hauptsächlich die Neandertaler, die der Ostasiaten und Australier etwa der Peking- beziehungsweise der Java-Mensch.

Warum eskalierte diese Auseinandersetzung dermaßen, dass wissenschaftliche Veranstaltungen zu emotionsgeladenen Spektakeln um Stimmenfang ausuferten? Als einer der Urheber des Out-of-Africa-Modells habe ich verfolgt, wie sich manche Standpunkte angesichts neuer Fakten verschoben, wie Strohmänner errichtet und nie behauptete Extrempositionen unterstellt wurden. So war das Afrika-Modell von Anfang an viel differenzierter gemeint, als unsere Gegner – und die Medien – es oft darstellen.

Ein zentraler Streitpunkt dieser Debatte betrifft die Frage, wie eng Asiaten, Australier, Europäer und Afrikaner miteinander verwandt sind. Bei einer jungen gemeinsamen afrikanischen Wurzel müssten die heutigen Populationen einander viel mehr ähneln, als wenn jede der Weltregionen seit ein bis zwei Millionen Jahren ihre weitgehend eigene Evolution erlebt hätte. Umgekehrt sollten die heutigen Menschengruppen Merkmale der archaischen Menschen ihrer Region übernommen haben, falls diese ihre Vorfahren waren. An den Fossilien müsste sich vieles davon ablesen lassen. Die Knochenfunde könnten auch zeigen, ob es in den einzelnen Weltgegenden lange, kontinuierliche Evolutionslinien bis in die jüngste Zeit gab oder ob Linien abbrachen und neue erschienen.

Bruch in Europa – Übergang in Afrika

Nun postulieren allerdings beide konträren Modelle, dass die Menschengruppen sich auch miteinander vermischten. Gerade das sorgte für manchen Zwiespalt. Das Out-of-Africa-Modell impliziert – entgegen vielen anderen Darstellungen – ausdrücklich, dass sich die modernen Menschen bei ihrer Ausbreitung mit den ansässigen archaischen Bevölkerungen kreuzen konnten und tatsächlich auch Genfluss stattfand. Denn diese Menschen, wie etwa die Neandertaler, stehen uns trotz einer längeren Phase eigener Evolution so nahe, dass sie derselben biologischen Art zuzurechnen sind. Hingegen meint das multiregionale Modell, dass zwischen den verschiedenen Entwicklungslinien stets genetischer Austausch stattfand. So blieb die nahe Verwandtschaft aller Menschen untereinander gewahrt.

Seit der Entdeckung der Neandertaler in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts suchten Paläoanthropologen nach Fossilien von Übergangsformen dieses massigen Wesens hin zum heutigen Menschen. Evo-

J. CHRISTEN, REISS-ENGELHORN-MUSEEN MANNHEIM; WISSENSCHAFTLICHE REKONSTRUKTION: W. SCHNAUBELT UND N. KIESER / WILDLIFE-ART

Ob die Kinder von Neandertalern (rechts) und modernen Menschen (links) sich so gut verstanden wie diese lebensechten Figuren der aktuellen Ausstellung »MenschenZeit« in den Mannheimer Reiss-Engelhorn-Museen (siehe auch S. 90), bleibt offen. Doch sicherlich kannten die beiden Menschengruppen einander gut. Wahrscheinlich zeugten sie auch gemeinsamen Nachwuchs.

lutionsforscher glaubten zunächst, der hoch entwickelte Mensch müsse in Europa entstanden sein. Doch dies nachzuweisen erwies sich als schwierig. Die Cro-Magnon-Menschen mit ihrem hohen Schädel und relativ leichten Skelett, von denen die ersten Fossilien im 19. Jahrhundert unter einem gleichnamigen Felsdach in der Dordogne in Frankreich gefunden wurden, sahen bereits völlig modern aus. Sie lebten jedoch erst vor 30 000 oder höchstens 40 000 Jahren. Davor besiedelten Europa offenbar allein die Neandertaler, die trotz ihres großen Gehirns viele spezielle Kennzeichen aufwiesen. Wie erklärte sich der Bruch zwischen beiden Menschenformen?

Aufschlussreicher, wenn auch zunächst schwer zu deuten, erschien bereits Anfang der 1970er Jahre die Fundlage in Afrika. Fossilien von eindeutig modernen Menschen aus der Border-Cave in Südafrika hatten offenbar ein Alter von rund 100 000 Jahren. Ein Skelett aus der Kibish-Formation im Omo-Tal Äthiopiens datierten Geologen sogar auf 130 000 Jahre, dies allerdings damals mit einer unsicheren Messmethode. Diese Menschen besaßen bereits ein großes Gehirn mit über 1300 Kubikzentimeter Volumen, ein ausgeprägtes Kinn, steile seitliche Schädelwände, eine modern gewölbte Stirn und andere bezeichnende Merkmale des Gesichts und Schädels. Verwirrenderweise hielten Anthropologen in den frühen 1970er Jahren aber einige afrikanische Fossilien von noch recht archaischen Menschenformen mit dicken Überaugenwülsten und ziemlich flacher Stirn, wenn auch schon ziemlich großem Gehirn für viel jünger. Beispielsweise galten solche Funde aus Sambia und Tansania als nur 50 000 oder gar 30 000 Jahre alt. Hatten in Afrika etwa moderne und archaische Menschen lange Zeit nebeneinander existiert und jede Linie ihre eigene Evolution durchgemacht? Ähnliches hatten Anthropologen früher auch für Europa angenommen. Sie mussten diese Idee aber schließlich aufgeben.

Die Sachlage begann sich bald mit neuen Datierungen zu klären. Für die archaischen afrikanischen Fossilien ergab sich nun ein wesentlich höheres Alter. Eine Anzahl neuer Funde und Messwerte kam rasch hinzu. So beschloss ich 1978, dieses Material zu sichten und dann zu versuchen, die Geschichte des *Homo sapiens* in Afrika neu zu rekonstruieren. Dazu wollte ich möglichst alle Funde einbeziehen, die jünger als 600 000 Jahre waren. Noch ältere Fossilien gehörten zum *Homo erectus* – dem Frühmenschen, aus dem der *Homo sapiens* entstanden war. Mehrere Jahre lang reiste ich durch Afrika, besuchte die Museen und Fundstellen, befasste mich mit den neuen Altersbestimmungen und untersuchte vor allem die Fossilien.

Die Zusammenschau ergab ein ziemlich deutliches Bild. Die afrikanischen Fossilien schienen eine Entwicklung vom *Homo erectus* über einen archaischen bis hin zum modernen *Homo sapiens* über mehrere hunderttausend Jahre zu bezeugen, was für Europa nie gelungen war. In Afrika hingegen fanden sich Zwischenfor- ▷

men verschiedenen archaischen oder modernen Grades. Die ältesten Fossilien von *Homo sapiens* wirken noch recht ursprünglich, wenn auch vom *Homo erectus* deutlich unterscheidbar. Diese Menschen bezeichnen wir als früharchaischen *Homo sapiens*. Um einiges jünger sind die spätarchaischen Vertreter, die man genauso gut fast-modern nennen könnte. Die noch jüngeren Fossilien erscheinen anatomisch gänzlich modern. Diese Menschen unterschieden sich im Körperbau und Schädel grundsätzlich nicht mehr von uns.

Das wichtigste Ergebnis dieser Analyse war, dass die Modernisierung langsam und schrittweise geschah und bereits vor etwas über 100 000 Jahren zum vollständig modernen Menschen in Afrika führte. So früh trat er nirgends sonst auf der Welt auf.

Ich fasste diese Befunde in einem Modell zusammen, das ich 1982 auf dem ersten Internationalen Kongress für Paläoanthropologie in Nizza vorstellte. Es besagt, dass nur in Afrika eine Evolution zum modernen Menschen stattgefunden habe und dass dieser dort viel früher aufgetreten sei als in irgendeiner anderen Region der Welt. Den populären Namen erhielt das Modell erst später in Anlehnung an den 1985 verfilmten Afrika-Roman der dänischen Autorin Tania Blixen »Out of Africa« (deutsch: »Jenseits von Afrika«). Einige der Kollegen begrüßten diese neue Idee, andere bekämpften sie. Fast jedes größere anthropologische Treffen erlebte fortan einen heftigen Schlagabtausch beider Lager.

Die Kontroverse spitzte sich zu, als 1987 eine spektakuläre molekularbiologische Arbeit erschien, die das Afrika-Modell stützte. Eine Gruppe um die amerikanische Genetikerin Rebecca Cann hatte Erbsequenzen von heutigen Frauen verschiedener Weltregionen verglichen. Dies war Erbgut der Mitochondrien – der Kraftwerke von Zellen mit eigener DNA –, welche nur über die Eizelle an Söhne und Töchter ererbt werden. Da sich in den betreffenden Erbabschnitten mit der Zeit Mutationen anhäufen, unterscheiden sich die weiblichen Abstammungslinien umso mehr, je länger sie getrennt verliefen.

Falsch verstandene Eva

Cann und ihre Kollegen ermittelten eine der gesamten heutigen Menschheit gemeinsame Wurzel, die nicht älter als rund 200 000 Jahre zu sein schien und in Afrika lag. Dieses Postulat wurde unter dem Namen »Eva-Theorie« bekannt. Denn wenn man die Mitochondrienlinien einer Population rechnerisch über die Generationen zurückverfolgt, nimmt die Zahl der direkten weiblichen Vorfahren kontinuierlich ab.

Stark abweichende Erbmuster hatten die Forscher in dieser Studie nirgends gefunden, nicht einmal in Südostasien, wo archaische Menschen wohl besonders lange existierten. Die Molekulargenetiker folgerten, ältere regionale Muster hätten zum Genpool des frühen modernen Menschen nicht viel beigetragen. Eine Vermischung hielten sie dennoch für durchaus wahrscheinlich. Nach statistischen Erwägungen könnten die Mitochondrienlinien archaischer Populationen innerhalb der Jahrtausende verloren gegangen sein.

Doch die Multiregionalisten propagierten bald, die Eva-Theorie sei mit dem Out-of-Africa-Modell gleichzusetzen. Zudem würden beide Modelle jegliche Vermischung bei der Ablösung der archaischen durch moderne Populationen ausschließen. Diese Interpretation entsprach aber weder dem Afrika-Modell noch den Auffassungen der Molekulargenetiker. Doch sie erschien den Multiregionalisten bei ihrer Argumentation offenbar hilfreich. Indem diese Forscher für das gegnerische Modell jeglichen Genfluss ausschlossen, behaupteten sie nun – unsinnigerweise –, jeder noch so geringe Hinweis auf Vermischung würde eine afrikanische Herkunft des modernen Menschen widerlegen. Dafür nannten sie zahlreiche Beispiele.

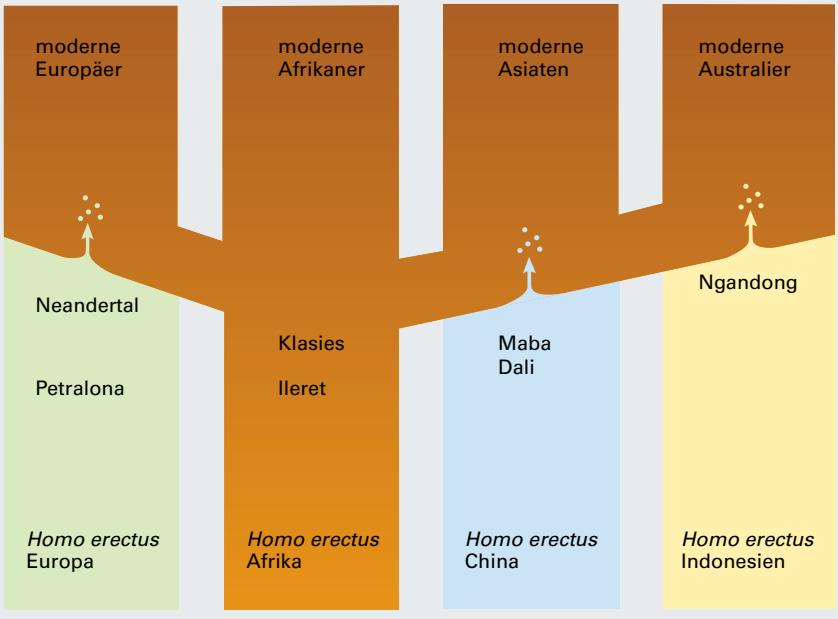
In ihrer viel zu extremen Einordnung sahen sie sich durch einen Test bestätigt, den mein langjähriger Mitstreiter Chris Stringer zusammen mit Peter Andrews, beide vom Museum für Naturgeschichte in London, anhand der weltweit vorhandenen Fossilzeugnisse durchführten. Dieser Test sollte zeigen, ob multiregionale Evolution oder Ablösung der entscheidende Prozess bei der Entstehung des modernen Menschen war. Das Ergebnis sprach deutlich für das Afrika-Modell – was umso bemerkens-

Das Out-of-Africa-Modell

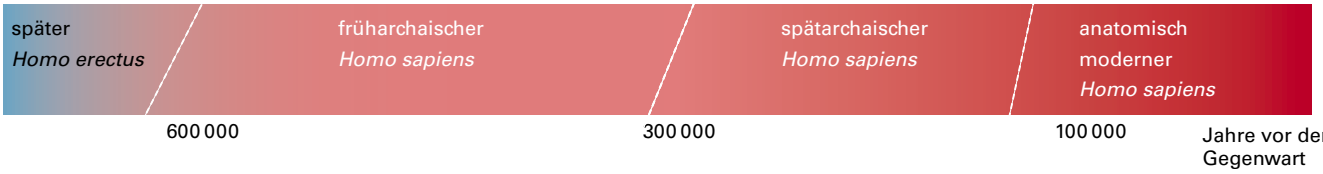
Die Fakten sprechen dafür: Die ersten anatomisch modernen Menschen lebten in Afrika. Von dort breiteten sie sich in andere Regionen aus, wo sie schließlich die dortigen älteren Menschenformen ablösten. Auch die Neandertaler gingen vor 30 000 Jahren unter.

Somit hat die heutige Menschheit eine recht junge gemeinsame Wurzel in Afrika. Erbgut archaischer Europäer oder Asiaten dürfte später nur in geringem Maß eingeflossen sein (Bild).

Konträr zu diesem vor zwanzig Jahren entworfenen **Out-of-Africa-Modell** steht das **multiregionale Modell**: Danach entstand der moderne Mensch auf mehreren Kontinenten im Wesentlichen aus regionalen Vorläufern. Die Fossilfunde widerlegen diese Ansicht. In den meisten Regionen trat der moderne Mensch plötzlich übergangslos auf, nur in Afrika nicht. Dort kündigte er sich durch Fossilien wie den Ileret-Schädel an. Die Klasies-Funde sind schon modern.

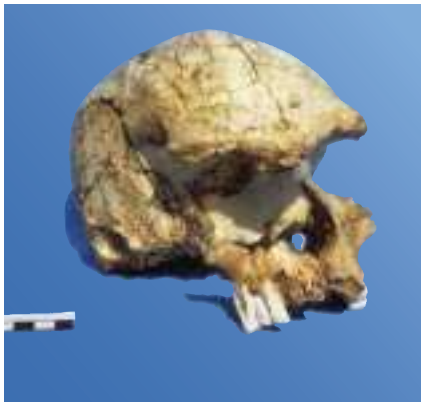


GÜNTER BRÄUER / THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



früharchaischer *Homo sapiens*
600 000 Jahre (Bodo d'Ar, Äthiopien)

spätarchaischer *Homo sapiens*
250 000 Jahre (Laetoli, Tansania)



früher moderner *Homo sapiens*
130 000 Jahre (Omo, Äthiopien)

ALLE DREI FOTOS: GÜNTER BRÄUER

Nur in Afrika finden sich zahlreiche Fossilien von Übergangsformen zum modernen Menschen.

werter ist, als die beiden Forscher nur eine stark vereinfachende Version prüften, bei der sie absichtlich jede Vermischung mit archaischen Linien ausschlossen.

Doch sogleich schlugen die Multiregionalisten zurück: Der Test beweise, dass das gegnerische Lager in Wahrheit ein rein afrikanisches Erbe des modernen Menschen ohne jede Vermischung mit älteren Populationen vertrete. Sie konzentrierten ihre Studien nun darauf, bei den eurasischen und australasiatischen Fossilien Merkmale aufzuzeigen, die regional von den Frühmenschen her überdauert hätten. Stringer und ich konterten, diese Multiregionalisten hätten einen Strohmann aufgebaut. Denn beim Out-of-Africa-Modell haben wir ein gewisses Maß an Genfluss nie ausgeschlossen. Trotzdem führte die Missdeutung noch über Jahre zu einer künstlichen Polarisierung der Debatte.

Die wirklich relevante Frage aber war und ist, ob solche Anzeichen einer kontinuierlichen regionalen Evolution tatsächlich existieren. In den letzten Jahren sind denn auch zahlreiche Studien hierzu für die drei großen Regionen außerhalb Afrikas erfolgt. Dabei stellten sich viele vermeintliche Hinweise als falsch oder wenig aussagekräftig heraus.

Besonders Ostasien halten die Multiregionalisten für eine Region mit gut belegter evolutionärer Kontinuität vom *Homo erectus* bis zu den modernen Chinesen. Eine Gruppe um Wolpoff veröffentlichte 1984 eine längere Liste morphologischer Merkmale, die für frühere wie heutige Menschen Chinas typisch sein sollen. Diese Zusammenstellung stützt sich großenteils auf Beschreibungen des Frankfurter Anthropologen und Anatomen Franz Weidenreich, der in China während der 1930er und frühen 1940er Jahre die Relikte des Pekingmenschen analysiert hatte.

Etliche Forscher regte die Auflistung der Regionalisten zu eigenen Analysen an. Die Ergebnisse reichten von erheblichen Zweifeln am Beweiswert dieser Merkmale für eine kontinuierliche menschliche Evolution in China bis hin zu vehementer Kritik. So ergab eine der Studien, dass die betreffenden Kennzeichen nicht nur in Ostasien, sondern weltweit beim *Homo erectus* wie beim archaischen *Homo sapiens* vorkamen. Nach einer anderen Studie erscheinen diese Kennzeichen bei heutigen Chinesen sogar seltener als in anderen heutigen Bevölkerungen. Bezeichnenderweise traten sie selbst vor 10 000 Jahren in Nordafrika öfter auf als heute in China.

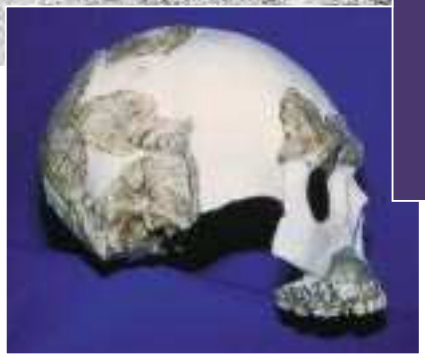
Die moderne Vielfalt der Gesichter

Weil die Ausbildung des Mittel- und Obergesichts im multiregionalen Modell stets als besonders wichtig galt, ließ ich diese Partien nochmals gesondert prüfen. Meine Doktorandin Toetik Koesbardiati verglich die heutige Verbreitung von mehr als dreißig angeblich regionalen Gesichtsmerkmalen bei vielen Bevölkerungen. Das Ergebnis war noch krasser, als wir erwartet hatten. Keine der morphologischen Ausprägungen des Gesichts tritt am häufigsten in China auf. Im Gegenteil finden sich die meisten davon sogar öfter in Afrika, in Europa oder in Australien.

Merkwürdigerweise erscheinen ein paar von jenen Merkmalen sehr häufig bei den Inuit Grönlands, deren flaches Gesicht sicherlich eine Anpassung an die extremen Umweltbedingungen ist und erst vor relativ kurzer Zeit entstand. Wir haben den Verdacht, dass die Auswahl vieler schon in der ersten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts vorgeschlagenen Merkmale von der damals üblichen typologischen Sichtweise wesentlich mitbestimmt war. Diese war mehr auf idealisierte, oft extreme Ausprägungen ausgerichtet als auf die tatsächlich vorhandene Variation.

Aber auch die chinesischen Fossilien, die zeitlich auf den *Homo erectus* folgen und als archaischer *Homo sapiens* klassifiziert werden, belegen keineswegs eine lange kontinuierliche Evolution zum modernen Menschen. Bei ihnen finden sich nicht einmal die fragwürdigen regionalen Merkmale. So besitzt etwa der 200 000 Jahre alte Schädel aus Jinniushan in Nordchina weder ein wenig vorspringendes Mittelgesicht noch einen flachen Nasensattel noch fehlen ihm anlagebedingt die Weisheitszähne.

Zwischen den archaischen und den ältesten modernen Menschen Chinas weist die Fossilreihe offensichtlich einen Sprung auf. Die frühesten modernen Fossilien stammen von Liujiang im südlichen China und aus der so genannten Oberhöhle der Pekingmensch-Fundstelle bei Zhoukou- ▷



ALLE FOTOS AUF DIESER DOPPELSEITE: GÜNTER BRÄUER

An dieser Stelle bei Ileret in Nordkenia fand Wambua Mangao (links) vom Nationalmuseum Kenias in Nairobi den rechts abgebildeten Schädel eines spätarchaischen *Homo sapiens*. Der Ileret-Mensch, der vor rund 270 000 Jahren lebte, unterschied sich anatomisch von uns nur noch wenig.

▷ dian. Sie gelten als 20 000 bis 30 000 Jahre alt. Nach neuesten Untersuchungen könnte das Skelett aus Liujiang sogar ein Alter von bis zu 70 000 Jahren haben. Jedoch hat es ein Amateur ausgegraben, und die genaue Fundschicht ist nicht bekannt.

Die Schädelform dieser ersten modernen Fossilien Chinas ähnelt noch nicht der heutiger Chinesen. Vielmehr gleicht sie, wie verschiedene Studien zeigen, frappierend denen mehrere zehntausend Jahre alter anatomisch moderner Afrikaner und Europäer. Selbst heutigen Afrikanern und Europäern sahen diese Menschen ähnlicher als heutigen Chinesen. Deren Aussehen dürfte sich demnach erst in den letzten Jahrzehntausenden herausgebildet haben.

Auch für Europa haben neuere Forschungsergebnisse die Kontinuitätsannahme immer problematischer werden lassen. Inzwischen findet die Vorstellung, das sich der moderne Mensch hier aus dem Neandertaler entwickelte, selbst bei den Multiregionalisten nur noch wenige Anhänger. Nach den Altersbestimmungen von Fossilien beider Menschenformen erscheint dies kaum noch möglich. Dafür stellt sich nun die Frage, wie stark sich die Neandertaler mit den Cro-Magnon-Menschen vermischten, also wie viel Neandertaler in den Europäern steckt – oder noch in der frühen anatomisch modernen Bevölkerung Europas steckte.

Wieso wandelte sich das Bild so eindeutig? Als ein möglicher Schauplatz für den Übergang zum modernen Menschen auf unserem Kontinent galt für einige Zeit das südliche Zentraleuropa. Fred Smith von der Loyola University in Chicago hielt die Fossilfunde aus Kroatien von Neandertalern und anatomisch modernen Menschen lange für Belege einer solchen Evolution. Doch neueste Datierungen ergaben, dass die jüngsten Neandertaler-Skelettreste aus der dortigen Vindija-Höhle mit nur 28 000, vielleicht sogar 27 000 Jahren deutlich jünger sind als früher angenommen. Ähnlich späte Neandertaler kannte man bisher nur von der Iberischen Halbinsel, die als deren letztes Refugium galt. Auch ein frühes anatomisch modernes Fossil aus Kroatien ist nicht 34 000, sondern nur 5000 Jahre alt. Moderne Menschen lebten aber im südlichen Zentraleuropa, etwa im Gebiet Tschechiens, schon vor mindestens 35 000 Jahren. Bereits vor 40 000 Jahren dürften sie über weite Teile Europas verbreitet gewesen sein. Dies schließen Prähistoriker – so Nick Conard und Michael Bolus von der Universität Tübingen und Paul Mellars von der Universität Cambridge – aus den Funden ihrer fortschrittlichen jungpaläolithischen Kultur des Aurignacien.

Dieser Unterkiefer eines der frühesten modernen Menschen aus den Klasies-River-Höhlen in Südafrika (siehe Bild rechte Seite) ist 100 000 Jahre alt.

Neandertaler und moderne Menschen traten also in Europa über 10 000 Jahre lang gleichzeitig auf. Bei einer so langen Koexistenz sind Begegnungen und auch Vermischungen anzunehmen. Letztere müssten sich in Fossilien deutlich zeigen, denn beide Menschenlinien waren recht unterschiedlich gebaut. Beide hatten sich aus älteren Formen entwickelt, der grazile moderne Mensch aber im afrikanischen Klima, der stämmige Neandertaler unter den eiszeitlichen Verhältnissen Europas.

Der gedrungene, schwere Körperbau der Neandertaler entstand sicherlich in Anpassung an ihre harsche Umwelt. Beispielsweise verminderten die kurzen Unterarme und -schenkel den Wärmeverlust.

Sicherlich besaßen diese Menschen zudem besonders viel Kraft und Ausdauer, wie etwa die dickwandigen Schäfte der Beinknochen und ausgeprägten Muskelansatzstellen des Oberkörpers zeigen. Doch auch ihre Schädel unterschieden sich deutlich von denen der Cro-Magnon-Menschen.

David Frayer von der University of Kansas in Lawrence, ein führender Vertreter der Multiregionalisten, meinte besonders in den zwischen 34 000 und 35 000 Jahre alten Fossilien frühmoderner Menschen von Mladeč in Tschechien Hinweise für eine Abstammung vom Neandertaler zu erkennen. Nach Auffassung des Afrika-Modells hätten dies aber auch Anzeichen einer Vermischung mit der archaischen europäischen Bevölkerung sein können. Die tschechischen Funde waren damit von besonderem Interesse in der spannenden Frage nach dem Ausmaß von Genfluss während der Periode der Koexistenz. So ließ ich meinen Diplomanden Helmut Broeg an den Mladeč-Schädeln sämtliche möglichen Indizien dafür akribisch dokumentieren.

Zu meiner Überraschung ließ sich nicht ein einziges eindeutiges Neandertalermerkmal aufspüren. Falls überhaupt vorhanden, wären an dieser Fundserie die Neandertalereinflüsse äußerst schwach. Sämtliche Schädel sind anatomisch vollständig modern, auch die robust gebauten männlichen. Ein paar der Schädel haben zwar ein leicht nach hinten vorgewölbtes Hinterhaupt, doch sie sind hinten längst nicht so stark abgeflacht und in der Weise am Hinterkopf ausgestülpt wie bei Neandertalern. Ähnliche Vorwölbungen weisen auch spätarchaische *Homo-sapiens*-Schädel aus Nordafrika auf, wie schon Smith vermerkte. Für ein afrikanisches Erbe könnte auch sprechen, das die 100 000 Jahre alten Schädel von frühen modernen Menschen aus Skhul und Qafzeh in Israel ein auffallend ähnlich geformtes Hinterhaupt besitzen. Das stimmt mit der Annahme überein, dass die Vorfahren der Cro-Magnon-Menschen die Route durch den Nahen Osten genommen haben.

Ob das viel diskutierte, etwa 24 500 Jahre alte, anatomisch moderne Kinderskelett von Lagar Velho in Portugal Hinweise auf Vermischung mit Neandertalern aufweist, wie Erik Trinkaus von der University of St. Louis in Missouri vermutet, ist nicht entschieden. Dieses Kind war zwar stämmig und hatte kurze Unterschenkel, doch könnte es sich dabei genauso gut um eine individuelle Ausprägung innerhalb der normalen Streubreite wie um eine Neuanpassung dieser Menschen an das Eiszeitklima handeln. Auch Mangelernährung wäre möglich. Zudem erscheint zweifelhaft, dass sich ein Merkmal der Neandertaler nach deren Aussterben noch über einige hundert Generationen so deutlich erhalten haben soll, während sonst Spuren von Vermischungen kaum sichtbar sind.

Getrennte Entwicklungslinien

Gegen eine evolutionäre Kontinuität in Europa sprechen überdies molekulargenetische Befunde der letzten Jahre. Einem Team um Svante Pääbo vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig gelang es, Abschnitte mitochondrialer DNA aus Knochen von zwei Neandertalern aus dem Neandertal bei Düsseldorf und Vindija in Kroatien zu sequenzieren. Gleiches gelang britischen Forschern mit einem Fossil vom Kaukasus. Die Erbsequenzen ähneln einander trotz der großen geografischen Distanzen. Sie unter- ▷

Bei den Klasies-River-Höhlen in Südafrika lebten schon vor 120 000 Jahren anatomisch moderne Menschen. Im kleinen Bild deutet der Ausgräber Hilary Deacon auf den Fundhorizont der ältesten Menschenreste.

scheiden sich aber deutlich von denen heutiger Menschen. Die Forscher schließen daraus, dass die Entwicklungslinien zu den Neandertalern und den modernen Menschen schon irgendwann vor 800 000 bis 300 000 Jahren auseinander liefen.

Dass die Neandertaler der modernen Konkurrenz nicht gewachsen waren und allmählich ausstarben, ließe sich begründen, auch wenn die Neuankömmlinge keine Gemetzel veranstalteten. Nach einer amerikanischen Berechnung hätte schon eine um zwei Prozent höhere Sterblichkeit genügt. Nachweislich hatten die Cro-Magnon-Menschen eine höhere Lebenserwartung. Sie trugen weniger Verletzungen davon, litten seltener unter Mangelernährung, Gelenkverschleiß und anderen Erkrankungen. Ihr schlankerer Körper war bei Nahrungsknappheit vorteilhaft. Sie verstanden sich mit genähter Kleidung sowie der Art ihrer Behausungen und Feuerstellen wohl auch besser warm zu halten. Mit ihren feingliedrigeren Händen dürften sie handwerklich geschickter gewesen sein. Auch ihr wahrscheinlich besseres Vorstellungsvermögen und die stärkere Überlappung der Generationen mit entsprechend intensiverer Tradierung mag ihnen geholfen haben, sich besser zu behaupten.

GÜNTER BRÄUER

Die Schädel des späten Neandertalers von La Chapelle-aux-Saints (links) und des frühen modernen Menschen von Mladeč in Tschechien unterscheiden sich in vielen Merkmalen deutlich (siehe Kasten unten).

Die Verhältnisse in Australasien blieben besonders lange unklar. Schon in den 1930er Jahren vertraten Anthropologen die Ansicht, dass die Fossilien des *Homo erectus* von Java eine Entwicklung belegen, die sich später bei den frühen, modernen Australiern fortsetzte. Multiregionalisten griffen diese Interpretation auf. Sie führten besonders Gesichtsmerkmale an.

Wolpoffs Anfang der 1980er Jahre vorgenommene Rekonstruktion des einzigen über eine Million Jahre alten Schädels mit gut erhaltenem Gesicht von Java, genannt Sangiran 17, ergab unter anderem einen stark vorspringenden Kiefer und ein charakteristisches Jochbein – Merkmale, die angeblich auch noch nur 10 000 Jahre alte australische Fossilien aufweisen. Neue Untersuchungen und eine neue Rekonstruktion durch ein japanisch-indonesisches Team konnten allerdings weder die Jochbeinmerkmale noch den stark vorspringenden Kiefer bestätigen.

Ohnehin wäre es höchst erstaunlich gewesen, wenn ein ganzes Set solcher Merkmale die Entwicklung vom massigen *Homo-erectus*-Schädel zu dem viel graziler en des modernen Menschen fast unverändert überdauert hätte. Allein die von den Multiregionalisten postulierten Genflüsse von außen würden dies sehr unwahrscheinlich machen.

Noch klarer widersprechen neue Fossildatierungen für Australasien einer Evolution zum modernen Menschen. So ist die Schädelserie des späten *Homo erectus* von Ngandong auf Java zur allgemeinen Verblüffung nicht 100 000 oder sogar 200 000 Jahre alt, sondern nur zwischen 30 000 und 50 000 Jahre. Trotzdem ähneln diese Schädel deutlich dem früheren *Homo erectus* Indonesiens.

Ahnen der ältesten modernen Australier können diese Frühmenschen nicht mehr gewesen sein. Erst vor wenigen Jahren ergab eine Neudatierung eines Skeletts vom Lake Mungo in Südaustralien, dass es nicht wie bisher angenommen 30 000 Jahre alt ist, sondern zwischen 40 000 und 60 000 Jahre. Dieser Mensch war ganz modern ge-

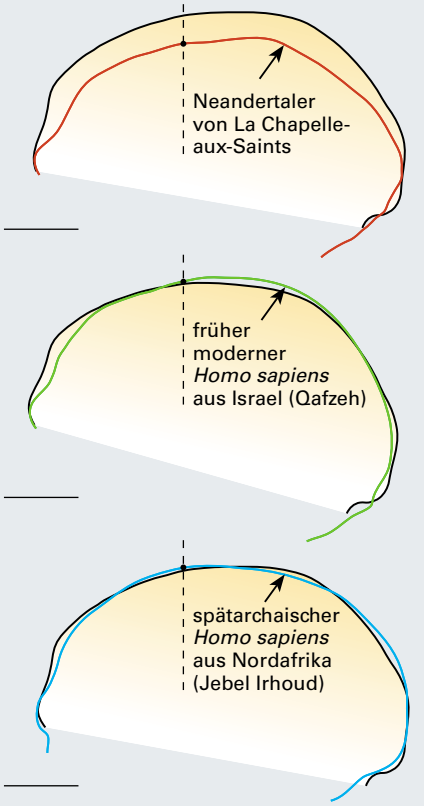
Kein europäisches Erbe

Die frühen modernen Menschen in Europa vermischten sich vermutlich mit den Neandertalern. Doch eindeutige Anzeichen dafür fanden sich bisher wenige.

Sogar die Fossilien früher moderner Menschen von Mladeč in Tschechien, die manche Multiregionalisten für Übergangsformen beider Menschengruppen hielten, ähneln nicht Skelettresten von Neandertalern, sondern von anatomisch modernen Menschen anderer Regionen.

Dies zeigt etwa ein Vergleich der Schädelumrisse von der Seite gesehen. Die schwarze Kontur stammt von einem männlichen Mladeč-Schädel. Die maßgebliche hintere Schädelpartie eines Neandertalers (rote Linie in der oberen Zeichnung) sticht davon deutlich ab.

Vielmehr ähnelt der Hinterhauptsvorsprung des Mladeč-Schädels dem von frühen modernen Menschen des Nahen Ostens (Mitte, grüne Linie). Diese Merkmalsausprägung erinnert sogar an archaische Vertreter von *Homo sapiens* aus Nordafrika (unten, blaue Linie).



GÜNTER BRÄUER / THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

baut und zudem recht grazil. Er stach damit von den archaischen Ngandong-Menschen aus derselben Zeit deutlich ab. Ein anderer, robust wirkender moderner australischer Schädel, für den die Multiregionalisten auf ein recht hohes Alter tippten, erwies sich nach neuester Datierung als nur 14 000 Jahre alt und kann daher keine Übergangsform zu modernen Australiern darstellen. Außerdem ist er nach Ansicht mehrerer Spezialisten durch krankhaftes Knochenwachstum verändert.

Die alte Deutung einer regionalen Entwicklung mag auch daher rühren, dass die australischen Schädelfunde in ihrem Aussehen eine recht große Bandbreite von Robustheit bis Grazilität aufweisen. Selbst für gleiche Regionen und Zeitabschnitte, so für die etwa 10 000 Jahre alten Schädel von Kow Swamp, fällt diese Variabilität auf. Teilweise wurde dies dadurch verstärkt, dass die Menschen die Köpfe ihrer Kinder verformten. Hauptsächlich dürften die Unterschiede aber darauf zurückzuführen sein, welche Merkmale die vereinzelten kleinen Gruppen, die Australien erreichten, zufällig trugen oder in dem zunehmend trockenen Klima erwarben. Vielleicht kam es auch bei manchen ihrer Vorfahren in Südostasien zu Vermischungen mit Menschen des späten *Homo erectus*.

Homo sapiens: älter als vermutet

Alles in allem haben die Erkenntnisse und neuen Funde der beiden letzten Jahrzehnte das Out-of-Africa-Modell im Wesentlichen bestätigt. Was die afrikanischen Fossilien betrifft, hat sich deren zeitliche Zuordnung dank neuer Datierungsmethoden inzwischen in einigen Details verschoben. Der archaische und der moderne *Homo sapiens* entstanden offenbar jeweils noch früher als zunächst angenommen.

So ist das älteste dieser Fossilien, der früharchaische Bodo-Hominide aus Äthiopien, etwa 600 000 Jahre alt. Damit dürfte der Übergang vom späten *Homo erectus* zum archaischen *Homo sapiens* mindestens 700 000 Jahre zurückliegen. Die jüngsten früharchaischen Vertreter lebten anscheinend bis vor etwa 300 000 Jahren.

Noch aufregender war die Datierung eines kenianischen Fossils vom Turkana-See, die vor einigen Jahren mit einer neuen absoluten Messmethode in Paris gelang. Richard Leakey sowie Emma Mbua vom Nationalmuseum Kenias in Nairobi und ich hatten diesen Ileret-Schädel 1992 beschrieben. Er wirkt schon fast modern. Unter anderem besitzt er aber noch ▷

TODD EBERLE

Nur Perücken, farbige Kontaktlinsen und viel Schminke waren erforderlich, um die Afro-Indianerin Andrea Searcy (links unten) scheinbar in eine Frau einer anderen Ethnie zu verwandeln. Dies soll deutlich machen, wie wenig sich die heutigen Menschen unterscheiden.

▷ einen durchgehenden Wulst über den Augenhöhlen, weswegen wir ihn als spätarchaisch einstuften. Nach meinem Modell sollte er über 100 000 Jahre als sein. Als die französischen Wissenschaftler aber sogar 270 000 Jahre ermittelten, dachten wir zunächst an einen Mess- oder Rechenfehler.

Doch wenige Wochen später gaben Kollegen für einen Zahn aus Südafrika eine ähnlich spektakuläre Altersbestimmung bekannt. Er gehörte zu einem Hominiden der gleichen Entwicklungsstufe dicht an der Schwelle zum modernen Menschen. Sein neues Alter betrug 259 000 Jahre – gegenüber vorher rund 150 000. Als drittes Fossil aus dieser Übergangszeit erbrachte ein fast vollständig erhaltener Schädel von Laetoli in Tansania ebenfalls 200 000 bis 300 000 Jahre. Heute ist gut belegt, dass derartige fast moderne Hominiden in Afrika etwa in der Zeit vor 300 000 bis vor 150 000 Jahren lebten.

Unmittelbar darauf trat der anatomisch völlig moderne Mensch auf. Verschiedene ihm eindeutig zugeordnete Fossilien von Südafrika sind an die 120 000 Jahre alt, ein sudanesisches Fossil sogar 150 000. Das früher nicht sicher datierte Skelett von Omo in Äthiopien scheint wirklich ein Alter von 130 000 Jahren oder noch etwas darüber zu haben. Die allmähliche Evolution des *Homo sapiens* auf diesem Kontinent belegen die vielen afrikanischen Mosaiksteinchen – auch aus dem Norden – recht überzeugend.

Außerhalb Afrikas erschien der moderne Mensch offenbar zuerst im Nahen Osten, wie 100 000 Jahre alte israelische Fossilien belegen. Erst später gelangte er nach Ostasien und nach Europa, wo er sich mit den ansässigen archaischen Menschenformen in geringem Ausmaß vermischt haben mag und diese schließlich ablöste. Es ist gut möglich, dass wir, versteckt im Zellkern, ein Neandertalererbe in uns tragen oder die Asiaten ein Erbe des Pekingmenschen. Noch scheint es Genetikern unmöglich, das nachzuweisen. Wir können bisweilen nur die Fossilien befragen.

Vor kurzem beschwerten sich Wolpoff und einige andere Vertreter des multiregionalen Modells, sie würden oft falsch verstanden: Eine mehrfache unabhängige Evolution des anatomisch modernen Menschen in verschiedenen Weltregionen hätten sie nie behauptet. Und selbst dem Grandseigneur der multiregionalen Theorie und Lehrer Wolpoffs, Loring Brace von der University of Michigan, werfen sie vor, er hätte das Modell nicht zutreffend beschrieben. Eigentlich kann man es kaum missverstehen. Ungeachtet dieser Klagen sind die Indizien zu Gunsten dieser Theorie so stark geschwunden, dass sich selbst Smith inzwischen klar für den Ursprung des modernen Menschen in Afrika ausspricht.

Wenn sich das Out-of-Africa-Modell weiterhin als zutreffend erweist, dann bedeutet dies, dass die Vielfalt der heutigen Menschheit vor weniger als 100 000 Jahren entstand. Somit dürften die Unterschiede zwischen Asiaten, Europäern und Afrikanern recht gering sein, was auch zahllose genetische Studien eindrucksvoll bestätigen. Den Wandel der letzten zwei Jahrzehnte in der Wissenschaft fasste Chris Stringer in die Worte: Unser Exodus aus Afrika, einst Ketzerei, ist inzwischen orthodoxe Lehrmeinung. ◁

Günter Bräuer ist Professor am Institut für Humanbiologie der Universität Hamburg. Er hat zahlreiche paläoanthropologische Forschungen in Afrika und Ostasien durchgeführt und war wesentlich an der Wanderausstellung »4 Millionen Jahre Mensch« beteiligt.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Die Evolution des Menschen. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 4/2002.

Vom Affen zum Menschen, Teil II: Evolution des Menschen. Spektrum der Wissenschaft, Compact 1/2002.

Der Mensch erscheint. 2. Die ersten Menschen. 3. Homo erectus. 4. Der moderne Mensch – Ursprung und Ausbreitung. Von Günter Bräuer und Jörg Reincke in: Brockhaus, Die Bibliothek, Vom Urknall zum Menschen. Leipzig, Mannheim 1999.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Ein Bild wie dieses hätte man noch vor einem Jahrzehnt nicht zuverlässig zeichnen können. Denn damals wusste noch niemand, was die Ausbrüche von Gammastrahlen auslöst – Blitze hochenergetischer Strahlung, die mehrmals täglich den Himmel aufleuchten lassen. Jetzt halten Astronomen sie für die Todeszuckungen eines massereichen Sterns: Ein Schwarzes Loch, das bei der Implosion eines Sterns entstanden ist, saugt Materiereste ein und stößt sie teilweise wieder in Düsenstrahlen aus. Eine Reihe von Stoßwellen in diesen »Jets« (Bildmitte) erzeugt dann den Gammablitz.

Die

MARK A. GARLICK

stärksten Explosionen im Universum

Bei jedem Gammastrahlen-Ausbruch wird ein Schwarzes Loch geboren.

Von Neil Gehrels, Luigi Piro und Peter J. T. Leonard

Es war am Morgen des 23. Januar 1999, als ein automatisches Teleskop im US-Bundesstaat New Mexico im Sternbild der Nördlichen Krone einen schwachen Lichtblitz auffing. Mit einem Feldstecher hätte man ihn gerade noch sehen können, doch in Wirklichkeit war es eine der stärksten Explosionen, welche die Menschheit jemals registriert hat. Denn der Ausbruch hatte seinen Ursprung in neun Milliarden Lichtjahren Entfernung, halb so weit, wie wir überhaupt in den Raum blicken können. In nur ein paar tausend Lichtjahren Entfernung wäre er uns so hell erschienen wie die Mittagssonne – und hätte die Erde mit so viel Strahlung bombardiert, dass er fast alles Leben ausgelöscht hätte.

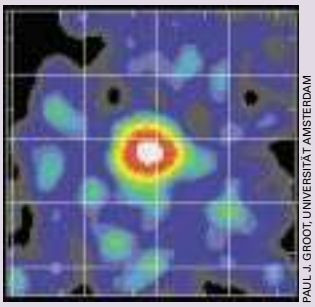
Der Blitz war einer jener berühmten Gammastrahlungsausbrüche (oder ▷

Ein (ziemlich) warmes Nachglühen

Im Röntgenbereich: Acht Stunden nach dem Gammablitz vom 28. Februar 1997 registrierten Astronomen (darunter einer der Autoren dieses Beitrags, Luigi Piro) mit dem Satelliten BeppoSax erstmals ein Nachglühen im Röntgenbereich. Das zweite Bild entstand ein paar Tage später; die Röntgenstrahlung war da bereits um den Faktor 20 schwächer geworden.

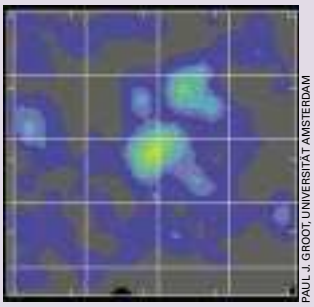
Im sichtbaren Licht: Schnell reagierten Astronomen auf der Kanarische Insel La Palma. Ihnen gelang es, dasselbe Nachglühen auch im sichtbaren Licht zu verfolgen (Pfeil). Nach einer Woche war das Licht auf ein Sechstel des ursprünglichen Wertes abgesunken, und die Galaxie, in der der Burst stattgefunden hatte, trat allmählich hervor.

Röntgenstrahlen



PAUL J. GROOT, UNIVERSITÄT AMSTERDAM

8 Stunden



PAUL J. GROOT, UNIVERSITÄT AMSTERDAM

3 Tage

sichtbares Licht

ENRICO COSTA, INSTITUTE OF SPACE ASTROPHYSICS AND COSMIC PHYSICS, CNR

21 Stunden

ENRICO COSTA, INSTITUTE OF SPACE ASTROPHYSICS AND COSMIC PHYSICS, CNR

8 Tage

▷ Gamma Ray Bursts, kurz GRBs), die seit mehreren Jahrzehnten die Astronomen in Erstaunen versetzten. Den ersten GRB hatten sie am 2. Juli 1967 gesichtet, mit Hilfe von Militärsatelliten, die auf Nuklearteststs im Weltraum lauerten. Diese kosmischen Explosionen unterschieden sich jedoch stark von allen irdischen, welche die Satelliten eigentlich nachweisen sollten. In den nächsten 35 Jahren wuchs das Rätsel mit jedem neuen GRB. Immer wenn die Forscher eine Erklärung gefunden zu haben meinten, tauchte ein neuer Aspekt auf, und das Rätselraten begann von neuem.

Nicht lokal, sondern kosmisch

In den letzten paar Jahren gelangen den Astronomen jedoch einige fundamentale Entdeckungen, die sie einer Erklärung des Phänomens deutlich näher brachten. Vor 1997 basierte fast alles, was wir über GRBs wussten, auf Beobachtungen mit dem Instrument Batse (Burst and Transient Source Experiment) auf dem Nasa-Satelliten CGRO, dem Compton Gamma Ray Observatory. Das Ergebnis: Jeden Tag ereignen sich irgendwo im beobachtbaren Universum zwei bis drei GRBs. Für Sekunden überstrahlen sie dann am Gamma-Himmel alle anderen Quellen. Zwar ist jeder Burst ein Individuum, aber sie fallen grob in zwei Kategorien: »kurze« GRBs, die weniger als zwei Sekunden dauern, und »lange«, die deutlich länger strahlen und die Mehrheit bilden. Beide Klassen unterscheiden sich auch spektroskopisch, denn kurze GRBs enthalten relativ mehr Gammastrahlen hoher Energie als lange. Der Burst vom Januar 1999 strahlte eineinhalb Minuten lang Gammastrahlung aus.

Das fraglos wichtigste Ergebnis der Batse-Messungen betraf die räumliche Verteilung der Bursts. Die Blitze treten »isotrop« auf, das heißt sie verteilen sich gleichmäßig über den ganzen Himmel. Das stellte die bis dahin vorherrschende Meinung in Frage, wonach die Gammablitze von lokalen Quellen innerhalb der Milchstraßenscheibe stammen sollten: Weil die Erde aber selbst in dieser Scheibe und außerhalb ihres Zentrums sitzt, hätten sich die Bursts in bestimmten Himmelsregionen häufen müssen. Ihre völlig gleichmäßige Verteilung sprach jedoch dafür, dass sich die Quellen über das gesamte Universum verstreut sind. Leider reichten die Gamma-Messungen von Batse alleine nicht aus, um diese Frage eindeutig zu klären. Was den Astronomen fehlte, waren Parallelbeobachtungen bei anderen Wellenlängen. Im sichtbaren Licht zum Beispiel würde man die Galaxien erkennen können, in denen die Blitze sich ereigneten. Auch ihre Entfernungen ließen sich dann ermitteln. Alle Versuche, Pendants der Gammablitze auch bei anderen Wellenlängen nachzuweisen, misslangen jedoch.

Erst 1996 kam der entscheidende Durchbruch mit dem Start von BeppoSax: Der italienisch-niederländische Röntgensatellit konnte zum ersten Mal die Positionen von Gamma Ray Bursts am Himmel exakt bestimmen und sogar ihr Nachglühen im Röntgenbereich entdecken. Dieses Nachleuchten setzt ein, wenn der eigentliche Burst verblasst. Es hält Tage bis Monate an, bevor es ganz verschwindet. Gleichzeitig sinkt auch die Energie der Strahlung, über das sichtbare Licht bis hin zu den Radiowellen. Zwar beobachtete BeppoSax ein solches Nachglühen nur bei langen GRBs –

IN KÜRZE

- Drei Jahrzehnte blieben die so genannten **Gamma Ray Bursts (GRBs)** ein Rätsel – nicht einmal ein grobes Bild der Vorgänge hinter diesen kosmischen Feuerwerken konnten die Astronomen zeichnen.
- In den vergangenen sechs Jahren stärkten jedoch Beobachtungen den Verdacht, dass die Hochenergieblitze durch Geburtswehen **Schwarzer Löcher** ausgelöst werden. Die meisten dieser Schwarzen Löcher entstehen, wenn ein massereicher Stern kollabiert. Dadurch wird ein intensiver Strahlungsimpuls freigesetzt, der noch Milliarden von Lichtjahren weit zu sehen ist.
- Die Astronomen schicken jetzt **neue Satelliten für bessere Daten** in den Himmel: Damit wollen sie die Theorie verfeinern und insbesondere die erstaunliche Vielfalt der GRBs besser verstehen.

ein ähnlicher Nachweis bei kurzen GRBs gelang bis heute nicht. Doch wurde es damit möglich, die Natur der kosmischen Blitze ein Stück weit aufzuklären.

Dank der Positionsdaten von BeppoSax konnten die Astronomen mit optischen und Radioteleskopen die Galaxien identifizieren, in denen die GRBs ihren Ursprung hatten. Fast alle dieser Objekte sind Milliarden von Lichtjahren entfernt. Das bedeutet wiederum, dass die Bursts ungeheuer energiereich sein müssen (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 9/1997, S. 30). Das spricht für extreme Ursachen, womit sich ein Zusammenhang mit den extremsten Objekten des Kosmos geradezu aufdrängte: den Schwarzen Löchern.

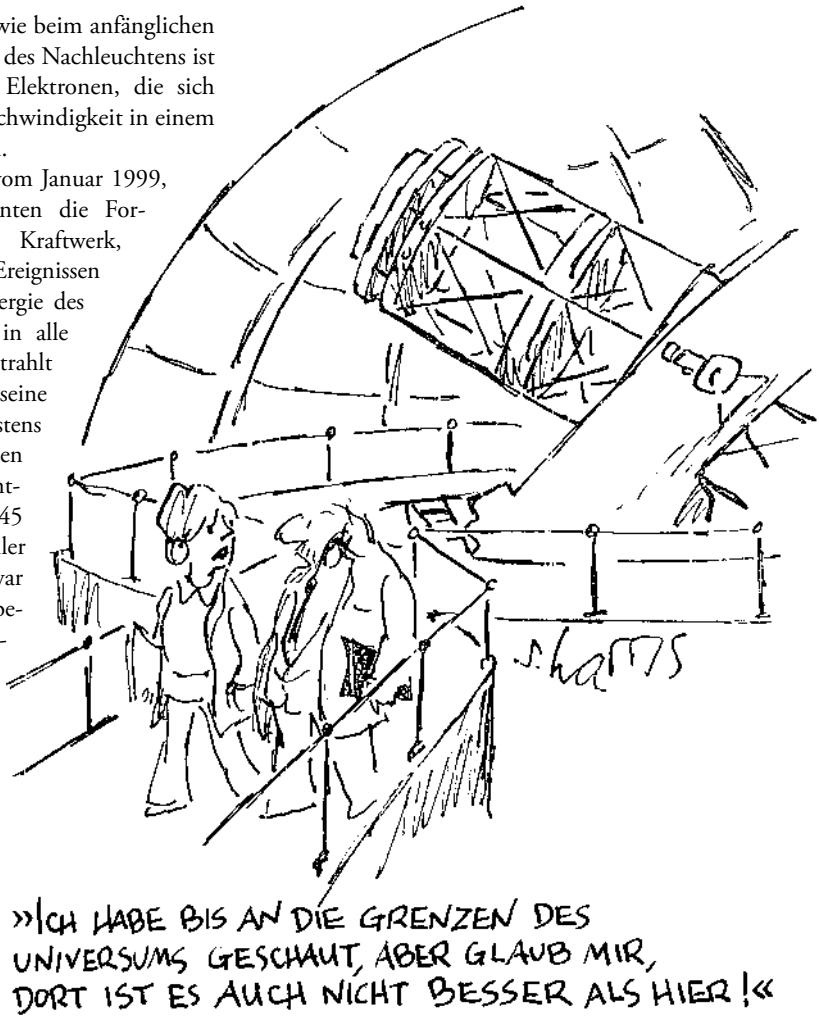
Flackernde Punktquellen

Zu den ersten Gammabursts, die BeppoSax am Himmel lokalisieren konnte, gehörte GRB970508, der so heißt, weil er am 8. Mai 1997 auftauchte. Radiobeobachtungen seines Nachglühens lieferten den entscheidenden Hinweis. In den ersten zwei Wochen schwankte die Radiointensität erratisch um den Faktor zwei, dann stabilisierte sich die Strahlung und schwächte sich von nun an langsam ab. Die großen Schwankungen zu Beginn führen die Forscher weniger auf die Burstquelle selbst zurück als auf die Ausbreitung der Strahlung durch den Weltraum. Ebenso wie die Erdatmosphäre sichtbares Sternenlicht zum Funkeln bringt, lässt auch interstellares Plasma Radioquellen in ihrer Helligkeit flackern (im Fachjargon »szintillieren«). Das funktioniert aber nur, wenn die Quelle so klein ist, dass sie astronomisch praktisch als Punkt erscheint. Planeten etwa flackern für irdische Teleskope kaum, weil sie kleine Scheibchen bilden.

Wenn GRB970508 also im Radiobereich zu Anfang szintillierte und später damit aufhörte, dann sollte die Quelle merklich von einem Punkt zu einer Scheibe angewachsen sein. »Merklich« bedeutet in diesem Zusammenhang einen Durchmesser von einigen Lichtwochen. Um diese Größe zu erreichen, muss die Quelle fast mit Lichtgeschwindigkeit expandiert sein.

Die Beobachtungen mit BeppoSax und später mit anderen Instrumenten haben das Bild der Astronomen von den Gamma Ray Bursts verändert. Ihre alte Vorstellung von einer plötzlichen Energiefreisetzung innerhalb weniger Sekunden gaben sie auf. Selbst den Begriff des Nachleuchtens halten sie heute für irreführend: Beim Nachleuchten wird ähnlich viel Energie abgestrahlt wie beim anfänglichen Blitz. Das Spektrum des Nachleuchtens ist charakteristisch für Elektronen, die sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit in einem Magnetfeld bewegen.

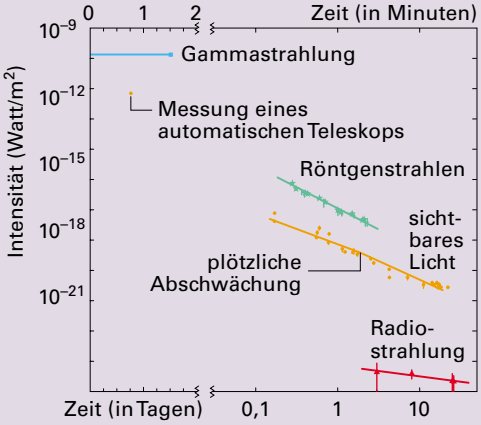
Mit dem Burst vom Januar 1999, GRB990123, erkannten die Forscher erstmals das Kraftwerk, das hinter solchen Ereignissen steckt. Wäre die Energie des Bursts gleichmäßig in alle Richtungen abgestrahlt worden, dann hätte seine Leuchtkraft mindestens 10^{45} Watt erreichen müssen (die Zahl entspricht einer 1 mit 45 Nullen), 10^{19}-mal heller als unsere Sonne. Zwar setzt die andere bekannte Art kosmischer Explosionen, eine Supernova, fast ebenso viel Energie frei; doch entweicht ihre Energie hauptsächlich in Form von Neutrinos, und der Rest wird über einen deutlich längeren Zeitraum abgestrahlt als bei ▷



Ein Blitz verblasst

Der hellste Ausbruch an Gammastrahlen, den Astronomen bisher beobachtet haben, ereignete sich am 23. Januar 1999. Sein allmähliches Verglimmen wurde im Gammabereich (in der Grafik blau), im Röntgenlicht (grün), im sichtbaren (orange) und im Radiobereich (rot) verfolgt. Am zweiten Tag schwächte sich das Signal deutlich ab – Indiz dafür, dass die Strahlung von schmalen Düsenstrahlen (»Jets«) extrem schneller Partikel stammt. Zwei Wochen nach dem Burst, als die Helligkeit des sichtbaren Lichts bereits auf ein Viermillionstel abgesunken war, erspähte das Hubble Space Telescope an der gleichen Himmelsposition eine stark deformierte Galaxie. In Galaxien dieses Typs entstehen besonders viele Sterne. Wenn Gammabursts bei Explosionen junger Sterne entstehen, dann sollten sie auch genau in solchen Regionen häufiger auftreten.

ANDREW FRUCHTER, SPACETELESCOPE SCIENCE INSTITUTE, UND NASA



CORNELIA BLIK

▷ den Gammablitzen. Zu jedem gegebenen Zeitpunkt hat eine Supernova also nur einen kleinen Bruchteil der Leuchtkraft eines GRB. Selbst die Energie speienden Quasare schaffen nur eine Strahlungsleistung von etwa 10^{40} Watt.

Sollte der Burst jedoch seine Strahlung, statt gleichmäßig in den Raum, nur in bestimmte Richtungen abgeben, dann wäre seine Gesamtenergie in Wirklichkeit viel geringer. Tatsächlich lieferte die Helligkeitsentwicklung des Nachleuchtens von GRB990123 Hinweise auf eine gebündelte Abstrahlung. Nach zwei Tagen fiel die Helligkeit des Bursts plötzlich rascher ab: So etwas geschieht durch einen relativistischen Effekt, wenn man einen nahezu lichtschnellen schmalen Gasstrahl fast genau von vorne beobachtet. Je langsamer das Gas, desto mehr zeigt sich der Jet – bis der gesamte Jet ins Gesichtsfeld gerät und sich von nun an der tatsächliche, schnellere Helligkeitsabfall beobachten lässt (siehe Grafik links unten).

Die Jets von GRB990123 und weiterer Bursts hätten demnach einen Öffnungswinkel von wenigen Grad. Nur wenn der Jet praktisch genau auf uns zielt, sehen wir den Burst überhaupt. Dieser »Beaming«-Effekt reduziert die Gesamtenergie, die ein Burst ausstrahlt, ungefähr mit dem Quadrat des Öffnungswinkels: Ein Jetstrahl von zehn Grad Breite würde rund 1/500 des Himmels abdecken und der Energieausstoß um den gleichen Faktor sinken. Wegen der Strahlbündelung sehen wir aber nur jeden 500. Burst und verpassen 499 andere. Selbst wenn man das Beaming berücksichtigt, hätte der GRB990123 aber immer noch eine beeindruckende Leuchtkraft von 10^{43} Watt.

Eine der interessantesten Entdeckungen der letzten Jahre war der mögliche Zusammenhang zwischen GRBs und Supernovae. Als 1998 Teleskope auf den Gammablitz GRB980425 einschwenkten, stießen sie nahe bei dessen Himmelsposition auf die Supernova SN 1998bw, die ungefähr zur selben Zeit explodiert war. Die Wahrscheinlichkeit, dass das nur ein Zufall war, lag bei 1:10 000.

Die Vermutung wird gestärkt durch die Beobachtung von Eisen in den Röntgenspektren mehrerer Bursts. Eisenatome entstehen in Supernova-Explosionen und werden dabei mit der expandierenden Wolke in den interstellaren Raum geblasen. Wenn diese Atome ihre Elektronen verlieren und sie sich später wiederholen, senden sie so genannte Emissionslinien ganz bestimmter Wellenlängen aus. Ersten vagen Hinweisen auf solche Linien durch BeppoSax und den japanischen Röntgensatelliten Asca im Jahr 1997 sind inzwischen aussagekräftigere Messungen gefolgt. Insbesondere konnte der Nasa-Satellit Chandra im Spektrum von GRB991216 solche Eisenlinien nachweisen. Damit bestimmten die Astronomen die Entfernung des GRB – sie passte exakt zur Entfernung der Galaxie, in welcher der Burst stattgefunden hatte.

Weitere Beobachtungen stützten den Zusammenhang zwischen GRBs und Supernovae. Auch im Röntgenspektrum von GRB990705 wurden Absorptionslinien von Eisenatomen entdeckt. Und in der Gashülle des Bursts GRB011211 entdeckte der europäische Röntgensatellit XMM-Newton Anzeichen von Emissionslinien der Elemente Silizium, Schwefel, Argon und anderer Elemente, wie sie gleichfalls von Supernovae ins All geblasen werden.

Haarscharf an der Erde vorbei

Obwohl Forscher die Details noch heftig diskutieren, setzt sich allmählich die Erkenntnis durch, dass unter bestimmten Bedingungen dasselbe Objekt sowohl einen Gammablitz als auch eine Supernova erzeugen kann. Nun sind GRBs viel seltener als Supernovae: Jeden Tag explodieren einige wenige GBRs irgendwo im Kosmos, während gleichzeitig hunderttausende Sterne als Supernovae enden. Nicht jede Supernova wird also mit einem Gammablitz assoziiert sein, manche aber schon. Nach einem Modell stoßen Supernovae manchmal Gasjets aus, die einen GRB erzeugen. In den meisten dieser Fälle würde man auf der Erde eine Supernova oder einen GRB sehen, aber nicht beides zusammen: Denn wenn der Jet zur Erde gerichtet wäre, dann würde der Burst die Supernova völlig überstrahlen. Zeigte er dagegen in eine andere Richtung, bliebe der GRB unsichtbar. Manchmal aber würde der Jet haarscharf an der Erde vorbeizeigen, und beide Phänomene wären nun simultan sichtbar: Genau das könnte beim GRB 980425 passiert sein.

Nach diesem Modell könnten die meisten oder alle GRBs mit Supernovae verknüpft sein. Nach einem etwas anderen Szenario träfe dies nur für eine Untergruppe der GRBs zu. Rund neunzig Prozent der Bursts, die Batse registrierte, bilden nämlich eine Klasse für sich: mit besonders geringer Leuchtkraft und extra langer Verzögerung zwischen hoch- und niederenergetischen Gammastrahlen. Letztere treffen bei diesem Blitztypus erst mit mehreren Sekunden Abstand ein. Wie das zustande kommt, ist völlig unklar, aber diese seltsamen GRBs treten etwa so häufig in Erscheinung wie ein besonderer Supernova-Typ (genannt Ib/c), bei dem das Zentrum eines massereichen Sterns explodiert.

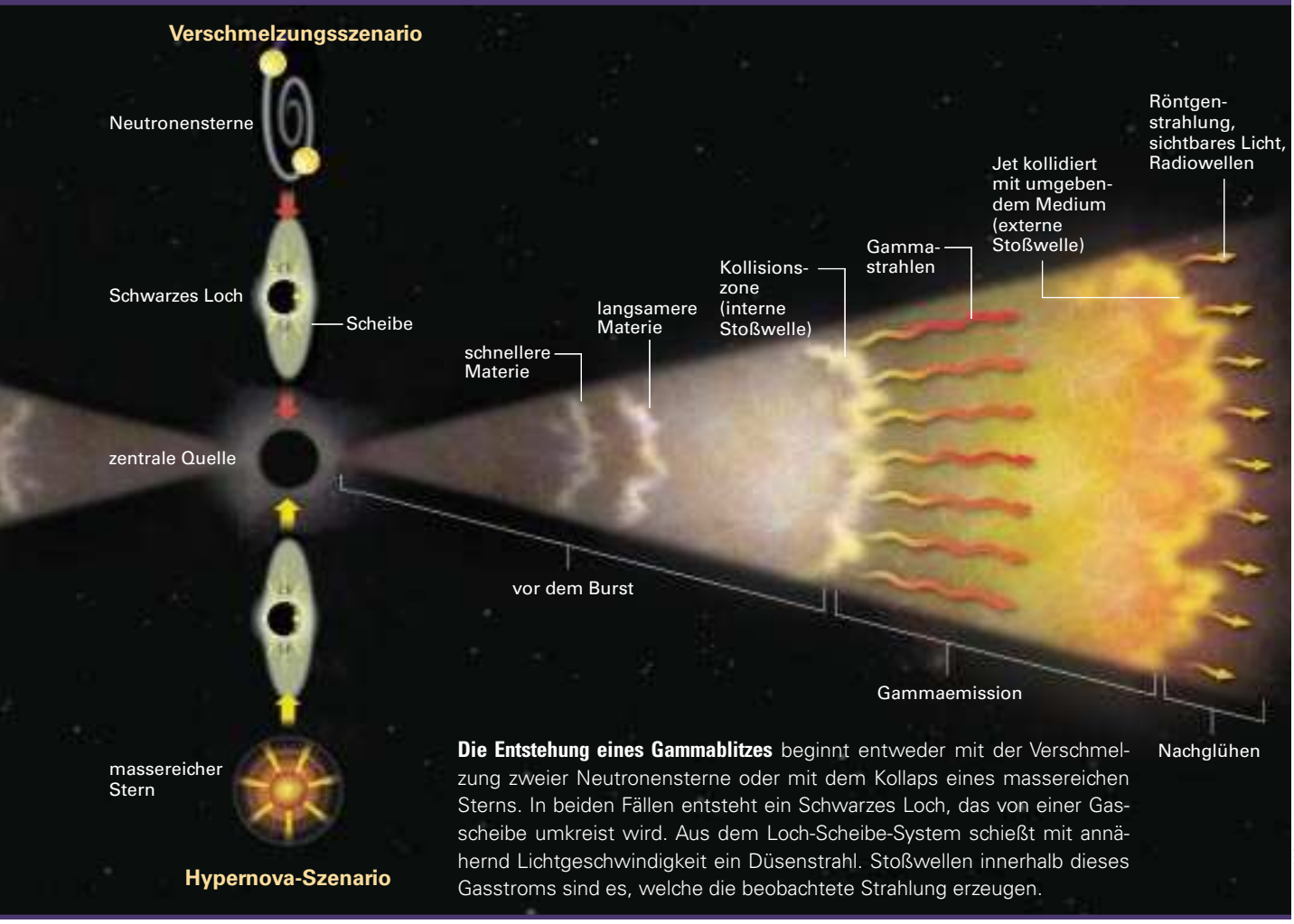
Selbst wenn man die Frage der Energieerzeugung in GRBs einmal außer Acht lässt, stellt schon ihre schiere Leuchtkraft ein Paradox dar. Schnelle Schwankungen der Helligkeit zeigen, dass die Strahlen aus einem sehr kleinen Gebiet herrühren: Eine

Jets und der Beobachter

Die Spezielle Relativitätstheorie beeinflusst, wie Beobachter die Jets von Gammablitzen wahrnehmen.

JUAN VELASCO

Ein Burst entsteht



Die Entstehung eines Gammablitzes beginnt entweder mit der Verschmelzung zweier Neutronensterne oder mit dem Kollaps eines massereichen Sterns. In beiden Fällen entsteht ein Schwarzes Loch, das von einer Gasscheibe umkreist wird. Aus dem Loch-Scheibe-System schießt mit annähernd Lichtgeschwindigkeit ein Düsenstrahl. Stoßwellen innerhalb dieses Gasstroms sind es, welche die beobachtete Strahlung erzeugen.

JUAN VELASCO

Leuchtkraft vom 10^{19}fachen der Sonne entweicht aus einem Volumen so groß wie die Sonne. Bei so viel Strahlung aus einem so kleinen Raum müssten die Photonen einander blockieren, ähnlich wie wenn bei einer Panik zu viele Leute gleichzeitig aus demselben Ausgang flüchten wollen und am Ende gar keiner mehr herauskommt. Aber wenn die Gammastrahlen nicht herausgelangen können, wieso können wir dann überhaupt GRBs sehen?

Die Lösung des Rätsels, die sich in den letzten Jahren abgezeichnet hat: Die Gammastrahlung wird nicht sofort freigesetzt. Vielmehr wird die Explosionsenergie zuerst in einer Schale aus Teilchen, einer Art Feuerball, gespeichert. Diese Explosionsschale expandiert fast mit Lichtgeschwindigkeit. Bei den Teilchen handelt es sich um Photonen ebenso wie um Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen. Der Feuerball schwillt in kurzer Zeit auf 10 bis 100 Milliarden Kilometer Durchmesser an (entsprechend dem zehnfachen Durchmesser der Plutobahn): Nun ist die Photonendichte weit genug abgesunken, dass die Gammastrahlen ungehindert entkommen können. Der Feuerball verwandelt jetzt einen Teil seiner Bewegungsenergie in Strahlung – und der Gammablitz entsteht.

Gebremster Feuerball

Die ursprüngliche Gammastrahlung bildet sich wahrscheinlich als Folge von Stoßwellen innerhalb des expandierenden Feuerballs. Solche »shocks« entstehen, wenn in der expandierenden Materie schnellere Teile langsamere überholen. Weil der Feuerball beinahe mit Lichtgeschwindigkeit anschwillt, wird nach der Relativitätstheorie die Zeitskala für einen Beobachter außerhalb dramatisch verkürzt: Selbst ein Burst, der sich über einen Tag hinweg entwickelt, scheint dann für uns in wenigen Sekunden abzulaufen. Der Feuerball dehnt sich weiter aus und beginnt allmählich das umgebende Gas aufzufegen. Dies löst erneut eine Stoßwelle aus, diesmal an der Grenze zwischen Feuerball und dem umgebenden Gas; sie bleibt erhalten, auch während der Ball abgebremst wird. Diese externe Stoßwelle erklärt bestens, warum Gammablitze nachleuchten und ihre Strahlungsenergie sich allmählich von Gamma- zur Röntgenstrahlung, zum sichtbaren Licht und zuletzt zur Radiostrahlung verschiebt.

Der Feuerball kann also die Explosionsenergie in beobachtbare Strahlung umwandeln – aber was verursacht die Explosion selbst? Das ist ein Problem für sich, zu dem es unter Astrophysikern noch keinen Konsens gibt. Im so genannten Hypernova-Szenario spielen Sterne mit der 20- bis 30fachen Sonnenmasse die zentrale Rolle. In Simulationsrechnungen entsteht bei ihrem finalen Kollaps ein rasch rotierendes Schwarzes Loch, das von einer Gasscheibe umkreist wird (siehe Grafik oben).

Bei anderen Modellen stehen am Anfang Sternsysteme aus zwei kompakten Objekten, etwa aus einem Paar Neutronensterne – ultradichten Sternresten – ▷

▷ oder einem Neutronenstern gepaart mit einem Schwarzen Loch. Beide Objekte bewegen sich in Spiralbahnen aufeinander zu und verschmelzen zuletzt zu einem einzigen Objekt. Genau wie beim Hypernova-Modell ist das Ergebnis ein einzelnes Schwarzes Loch mit einer Scheibe.

Die Kombination Loch plus Scheibe spielt bei vielen Himmelsphänomenen eine zentrale Rolle. Der Unterschied hier ist, dass auch die Scheibe eine beträchtliche Masse besitzt (was gewaltige Energien freisetzt) und dass es keinen Partnerstern gibt, der die Scheibe mit Gas »nachfüttern« könnte: So wird exakt ein Burst erzeugt, danach hat das System seine Energie verbraucht. Das Schwarze Loch wie die Scheibe besitzen zwei große Energiespeicher: die Gravitationsenergie der Scheibe und die Rotationsenergie des Schwarzen Lochs. Wie diese beiden Reservoirs genau angezapft werden, ist noch unklar. Denkbar ist aber, dass sich zugleich mit der rotierenden Gasscheibe auch ein kräftiges Magnetfeld aufbaut, zuletzt 10^{15}-mal stärker als das der Erde. Bei diesem Prozess heizt dieses Magnetfeld die Scheibe zu solch extremen Temperaturen auf, dass es einen Feuerball aus Plasma und Gammastrahlung ausschleudert, der entlang der Rotationsachse in zwei eng gebündelten Düsenstrahlen austritt.

Die Strahlung der Gammablitze wird von der Hypernova- und der Verschmelzungshypothese gleichermaßen gut erklärt. Also müssen zur Unterscheidung der Modelle andere Eigenschaften herangezogen werden. Die Verknüpfung von GRBs mit den Supernovae zum Beispiel spricht für Hypernovae, bei denen es sich letztlich um besonders starke Supernovae handelt. Auch werden GRBs typischerweise an Himmelsorten entdeckt, wo man auch Hypernovae erwartet: in Zonen, in denen zahlreiche Sterne entstehen. Ein massereicher Stern explodiert bald, schon nach einigen Jahrmillionen, und damit noch in der Nähe seiner Geburtsstätte. Bis zur Verschmelzung kompakter Objekte dauert es dagegen Jahrmilliarden. In der Zwischenzeit sind sie zumeist von ihrem Ursprungsort weggewandert. In den Geburtsstätten der Sterne würde man sie dann also gerade nicht erwarten.

Staubige Geburtsstätten

Obwohl Hypernovae wahrscheinlich die meisten GRBs erklären, könnten im Gesamtbild Verschmelzungen kompakter Objekte dennoch eine Rolle spielen. Dieser Mechanismus könnte die weiterhin rätselhaften Gammablitze besonders kurzer Dauer erklären. Die Astronomen haben beim Verständnis der GRBs große Fortschritte gemacht, doch was sie letztlich verursacht, ist weiterhin so unklar wie ihre Vielfalt und die Unterklassen des Phänomens.

Alle bisherigen Entdeckungen haben aber gezeigt, dass dieses Forschungsfeld einige der fundamentalsten Fragen der Astronomie beantworten könnte: Wie beenden Sterne ihr Leben? Wie und wo entstehen Schwarze Löcher? Und was ist die Natur der Jets kollabierter Objekte?

Eine der offenen Punkte bezieht sich auf die »dunklen« oder »Geister-«GRBs. Von diesen etwa dreißig GRBs, die bisher lokalisiert und in Wellenlängen außerhalb des Gammabereichs untersucht wurden, konnten rund neunzig Prozent auch im Röntgenbereich beobachtet werden – aber nur etwa die Hälfte im sichtbaren Licht. Warum leuchten manche Bursts im Sichtbaren nicht?

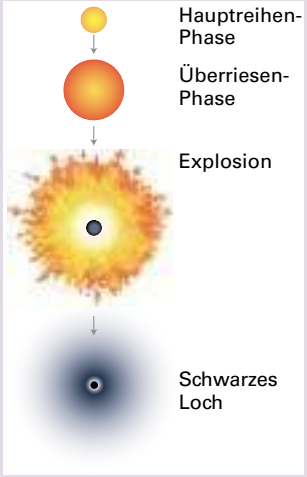
Einige Forscher führen dies schlicht auf die Lage der Explosion in den staubreichen Zonen stellarer Geburtsstätten zurück. Staub verschluckt sichtbares Licht, aber kaum Röntgenstrahlung. Eine alternative These besagt, diese Geisterblitze seien GRBs in so großer Entfernung, dass nur ihr sichtbares Licht von intergalaktischem Gas verschluckt wird. Um diese Hypothese zu testen, wären Entfernungsmessungen über die Röntgenspektren vonnöten. Bisher sprechen die meisten Beobachtungen für die Staub-Erklärung: Im Optischen und Radiobereich sind bereits die wahrscheinlichen Schauplätze zweier dunkler GRBs aufgespürt worden, und beide sind Galaxien in moderater Entfernung.

Ein anderes Mysterium sind »röntgenreiche« GRBs, auch Röntgenblitze genannt, wie sie ebenfalls von BeppoSax entdeckt und auch in den Batse-Daten nachgewiesen wurden: Zu ihnen zählen zwanzig bis dreißig Prozent aller GRBs. Sie geben mehr Röntgen- als Gammastrahlung ab,

Das Schicksal massereicher Sterne

Den Großteil ihres Lebens verbringen Sterne in der relativ beschaulichen Evolutionsphase auf der so genannten Hauptreihe, wo sie gemächlich per Kernfusion Wasserstoff in Helium umwandeln – so wie zurzeit unsere Sonne. Sterne mit mehr Masse als unsere Sonne strahlen heller und verbrauchen ihren nuklearen Brennstoff schneller: Ein Stern mit der 20fachen Sonnenmasse etwa hat daher nur ein Tausendstel der Lebenserwartung der Sonne.

Sobald der Wasserstoff im Kern verbraucht ist, schrumpft er und heizt sich auf. Jetzt setzt die Fusion schwererer Elemente wie Helium, Sauerstoff und Kohlenstoff ein. Der Stern quillt dabei zu einem Riesenstern auf, bei besonders schweren Sternen sogar zu einem so genannten Überriesen. Bei Himmelskörpern mit mehr als acht Sonnenmassen erzeugt die Kernfusion schwerere Elemente bis hin zum Eisen. Bei der Fusion von Eisenkernen wird aber keine Energie mehr frei, sondern im Gegenteil verbraucht: Der Stern steht plötzlich ohne Brennstoff da, der innere Gasdruck des Sterns kann seinem eigenen Gewicht nicht mehr standhalten.



CORNELIA BLIK

Das Ergebnis ist ein plötzlicher und katastrophaler Kollaps. Das Sternzentrum verwandelt sich in einen Neutronenstern mit mindestens 1,4 Sonnenmassen, komprimiert in eine Kugel von nur zwanzig Kilometer Durchmesser. Die Hülle des Sterns wird zugleich in den Raum geschleudert: Eine Supernova explodiert.

Neutronensterne können höchstens eine Masse von zwei bis drei Sonnenmassen besitzen: Wird diese Grenze überschritten, so ist ein Kollaps zu einem Schwarzen Loch unausweichlich. Ein Neutronenstern kann entweder durch zusätzliche Materie, die auf ihn einstürzt, über diese Grenze geschoben werden, oder ein Schwarzes Loch entsteht direkt beim Kollaps eines Sterns, der selbst schon mehr als zwanzig Sonnenmassen hat. Die Entstehung solcher Schwarzen Löcher halten die Astrophysiker für die Ursache der Gammastrahlenblitze.

Gammastrahlenblitze: eine Klassifizierung

Blitz-Klasse (Unterklasse)	Prozentsatz aller Blitze	Dauer der anfänglichen Explosion	anfängliche Gamma-emission	Röntgen-Nachglühen	Nachglühen im sichtbaren Licht	hypothetische Zentralquelle	Erklärung für die Besonderheiten
lang (normal)	25 %	20 s	✓	✓	✓	energiereiche Explosion eines masse-reichen Sterns	–
lang (dunkel)	30 %	20 s	✓	✓	✗	energiereiche Explosion eines masse-reichen Sterns	extrem weit weg, durch Staub verdeckt oder von sich aus schwach
lang (röntgenreich oder Röntgenblitze)	25 %	30 s	✗	✓	✗	energiereiche Explosion eines masse-reichen Sterns	extrem weit weg oder durch Extra-Teilchen behindert
kurz	20 %	0,3 s	✓	?	?	Verschmelzung von zwei kompakten Objekten	tritt außerhalb von Zonen mit Sternentstehung auf; dort ist das umgebende Gas dünner und die externen Stoßwellen fallen schwächer aus

und in extremen Fällen fehlt ihnen sogar die Gammastrahlung ganz.

Eine Erklärung dafür könnte so aussehen: Der Feuerball ist in diesen Fällen mit einer großen Menge Materie »verschmutzt«, vor allem durch Protonen. Diese Teilchen verzögern die Expansion der Explosionswolke, sie wächst dann langsamer an und kann weniger Photonen im Gammabereich erzeugen.

Nur bessere Messungen können solche Thesen abklären. Im nächsten Schritt der GRB-Forschung geht es daher um die Gewinnung noch besserer Daten über

- Bursts allgemein: ihr Nachglühen und die Galaxien, in denen sich die Bursts ereignen;
- Sondertypen: lange, kurze, helle und dunkle sowie solche, die überwiegend Gammastrahlen, und solche, die vorwiegend Röntgenlicht hervorbringen;
- Bursts mit und Bursts ohne Nachglühen.

Derzeit liefern der Satellit Hete-2 (High Energy Transient Explorer, gestartet im Oktober 2000) und das Interplanetary Network aus Gammasensoren auf Planetensonden die genauen Himmelspositionen von Bursts. Vom Satelliten Swift, der Ende 2003 starten soll, versprechen sich die Forscher Beobachtungen Hunderter von GRBs simultan in vielen Wellenlängen. Im sichtbaren Licht und im Röntgenbereich werden künftig die GRBs die Beobachtungen automatisch selbst auslösen: Schnell ließe sich dann feststellen, ob es ein Nachleuchten im Röntgen- oder sichtbaren Bereich gibt.

Ein weiteres Ziel sind Untersuchungen bei Energien im extremen Gammabereich. Der GRB940217 strahlte zum Beispiel noch über eine Stunde nach dem Beginn des Blitzes Gammastrahlung hoher Energie ab. Das zeigten Messungen mit dem Compton-Satelliten. Die Physik dahinter ist Forschern noch schleierhaft. Der italienische Agile-Satellit soll ab 2004 GRBs bei solch hohen Energien beobachten. Der besonders empfindliche Nasa-Satellit Glast, geplant für 2006, wird dann ebenfalls eine Schlüsselrolle bei Untersuchungen dieses Phänomens spielen.

Andere Missionen, die nicht primär für die Entdeckung von GRBs ausgelegt sind, sollen gleichwohl Beiträge dazu leisten. Der Esa-Satellit Integral, gestartet am 17. Oktober 2002, hat bereits seinen ersten GRB entdeckt und könnte pro Jahr zehn bis zwanzig dieser Hochenergieblitze registrieren. Und das für 2012 geplante »Energetic X-Ray Imaging Survey Telescope« sollte mit einem besonders empfindlichen Detektor Tausende von GRBs ausmachen können.

Aufregende Jahre liegen nun hinter uns, in denen sich die Gamma Ray Bursts als die stärksten Explosionen des Weltalls entpuppt haben, die über alle Weiten des Kosmos verteilt sind. Sie verschaffen uns die Möglichkeit, neue Bereiche der Physik zu untersuchen. Durch sie lässt sich das ganz junge Universum kennen lernen, als zum ersten Mal Sterne in großer Zahl entstanden. Beobachtungen im Weltraum und von der Erde aus werden uns diese außergewöhnlichen Objekte und Ereignisse noch näher bringen. Absolute Mysterien sind die Gammastrahlenausbrüche heute nicht mehr – aber das heißt noch nicht, dass das Rätsel schon völlig gelöst ist. ◁

Neil Gehrels (oben), **Luigi Piro** (unten) und **Peter J. T. Leonard** beobachten und analysieren Gammastrahlenblitze. Gehrels und Piro sind die führenden Wissenschaftler des Compton Gamma Ray Observatory sowie des Satelliten BeppoSax. Leonard ist Theoretiker und leitet die Gruppe für Gammastrahlen, Kosmische Strahlung und Gravitationswellen-Astrophysik des Labors für Hochenergie-Astrophysik am Goddard Space Flight Center der Nasa. Piro ist Mitglied des Instituts für Astrophysik und Kosmische Physik des CNR in Rom.

Flash! The Hunt for the Biggest Explosions in the Universe. Von Govert Schilling. Cambridge University Press, 2002.

The Biggest Bangs: The Mystery of Gamma-Ray Bursts, the Most Violent Explosions in the Universe. Von Jonathan I. Katz. Oxford University Press, 2002.

Blinded by the Light. Von Stan Woosley in: Nature, Bd. 414, S. 853, 2001.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Messung von kosmischer Strahlung

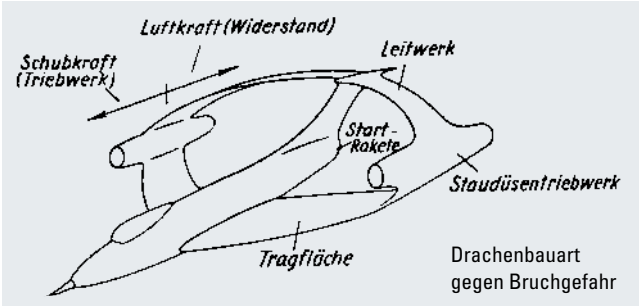
Das zwischen London und Singapore verkehrende Düsenverkehrsflugzeug Comet hat jetzt eine höchst ungewöhnliche Aufgabe zu erfüllen. Es soll helfen, das Geheimnis der kosmischen Strahlung zu ergründen. Daher haben Maschinen neuerdings Spezialphotoplatten an Bord, die die Zahl und Art der kosmischen Partikel feststellen, die in der Flughöhe von rund 12000 m stark auftreten. Die Verwendung des Comet für diesen Zweck ist darum so vorteilhaft, weil sich das Flugzeug viel länger in der Stratosphäre aufhält als die bisher benutzten Meßballone. *(Naturwissenschaftliche Rundschau, 1953, S. 118)*

Übernachten Mauersegler in der Luft?

Der Schweizer Ornithologe Weitnauer hat eine ganze Population von Seglern in dem Dorf Oltingen in der Schweiz beobachtet. Die im Frühjahr ankommenden einjährigen Vögel, die noch nicht brutreif sind, verschwinden regelmäßig in der Abenddämmerung und erscheinen wieder am frühen Morgen. … Weitnauer stieg mit dem Flugzeug auf. … Er konnte noch 27 Minuten nach dem Verschwinden der letzten Brutvögel in ihre Nisthöhlen Flüge von 3 bis 50 Seglern in einer Höhe bis zu 1550 m erkennen. … Die Vermutung, daß Segler in der Luft übernachten, genau so wie Wasservögel auf dem Wasser, gewinnt dadurch an Wahrscheinlichkeit. *(Kosmos, 49. Jg., Heft 3, 1953, S. 143)*

Tragflächen für Schallgeschwindigkeit

Jeder Flügel ist bei solchen Geschwindigkeiten stets erhöhter Bruchgefahr durch die aus statischer Belastung und Verdichtungsstößen zusammengesetzten Beanspruchung ausgesetzt, solange er freitragend und infolgedessen nur einseitig mit dem Rumpf verbunden ist. Um dem entgegenzuwirken, erscheint es zweckmäßig, die pfeil- oder sichelförmigen Tragflächen außen so hochzuziehen,

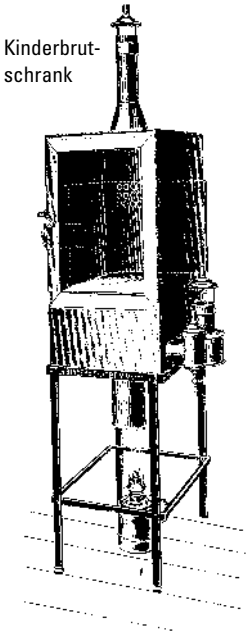


Drachenbauart gegen Bruchgefahr

daß sie kontinuierlich in das hochgelegte, negativ gepfeilte Höhenleitwerk (ähnlich der Tragfläche der Ju 287) übergehen und mit ihm einen verschobenen, flachovalen Ring bilden, wobei das Seitenleitwerk die zweite Verbindung zum Rumpf darstellt. … Diese Konfiguration würde es ermöglichen, die in jeder Tragfläche auftretenden mehrachsigen Spannungszustände auf ein Mindestmaß zu reduzieren, womit vor allem den Forderungen der Festigkeit bei Überschallflugzeugen Rechnung getragen wäre. *(Die Umschau, Heft 6, 1953, S. 187)*

Wärmschrank für zu früh geborene Kinder

Der Umstand, dass das frühgeborene Kind … nicht imstande ist, die gleich nach der Geburt um fast 2° herabgesunkene Temperatur aufzubringen, … macht oft alle Versuche der Lebenserhaltung zunichte. Hier kann … nur ein beständiges Höherhalten der Umgebungstemperatur helfend eingreifen, … das zur Konstruktion von Wärmkästen führte. … Dieser Wärmeschrank besteht aus dem Raum zur Aufnahme des Kindes, der von dem sog. Vorwärmer umgeben ist. … Unterhalb des Kindeslagers befindet sich ein Wasserkasten, in den 15 Liter kochenden Wassers gefüllt werden, das … die Brutraumtemperatur auf 30–35° einstellt; diese Wärme wird durch eine untergestellte Petroleumlampe auf gleicher Höhe erhalten. *(Die Umschau, 7. Jg., Nr. 2, 1903, S. 237)*


Kinderbrutschrank

Elektrizität in der Medizin

Höchst absonderlich mutet ein … vorgeführtes Experiment an, das mit unangreifbarer Sicherheit darlegt, daß lebende Wesen durch eine bestimmte Einwirkung schwacher Wechselströme in den Schlaf gewiegt und in einen Zustand absoluter allgemeiner und örtlicher Schmerzlosigkeit gebracht werden können. … Ähnliche Erscheinungen zeigte der Italiener Batelli, der mit hochgespanntem Gleichstrom bei Tieren den Herzschlag zum Aufhören brachte und nach längerem Aussetzen durch Wechselstrom wieder in Tätigkeit versetzte. Auch hier blieben alle Versuchsobjekte in ihren Gesundheitsverhältnissen vollkommen unbeeinflußt. Diese … Beobachtungen lieferten einigen Ärzten … Anregungen, Herzerkrankungen mit Elektrizität zu behandeln. *(Illustrierte Zeitung, Bd. 120, Nr. 3116, 1903, S. 422)*

Vanadiumstahl macht Panzerplatten dünner

Stahl besitzt mit einem geringfügigen Gehalt an Vanadium eine solche Härte, dass man die Dicke von Panzerplatten fast auf die Hälfte reduzieren kann. … Die Erklärung scheint in der ganz ausserordentlichen Affinität zu liegen, die Vanadium für Sauerstoff besitzt; jede Spur von Eisenoxyd wird in der flüssigen Masse sofort reduziert und so die Hauptursache eines Zerbrechens , die ohne Vanadium unvermeidlich ist, beseitigt. … Das Härtemaximum erzielt man bei Vanadiumstahl durch Erwärmen auf 700 bis 800°. *(Naturwissenschaftliche Wochenschrift, Bd. 2, Nr. 22, 1903, S. 262)*

Spektrum Lehr- & Fachbücher

Jetzt preisreduziert!

Wenn die Erde Feuer spuckt ...

Jacques-Marie Bardintzeff

Vulkanologie

Vulkane gehören zu den spektakulärsten Erscheinungen auf der Erde. Dieses reich illustrierte und gut verständliche Buch beleuchtet sämtliche Facetten dieses immer wiederkehrenden Natur-Feuerwerks! Jeder, der sich im Studium oder Beruf oder privat für Vulkane interessiert, wird dieses Buch als reiche Fundgrube zu schätzen wissen.

2003, 280 S., 154 Abb., br.

Früher € 39,95, jetzt € 19,95

ISBN 3-8274-1221-8

Ulrich Lehmann

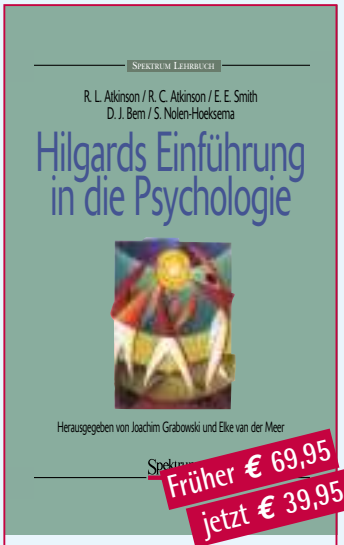
Palöontologisches Wörterbuch

Fachausdrücke sind notwendig, oft unentbehrlich zur Verständigung. Aber sie dürfen den Zugang zum Eigentlichen einer Wissenschaft nicht blockieren. Solches zu verhindern, war von der ersten Auflage an der Zweck dieses Handbuches. Die in der deutschsprachigen paläontologischen Literatur gebräuchlichen Fachausdrücke werden in diesem handlichen Wörterbuch in möglicher Kürze erläutert und sprachlich abgeleitet.

2003, 325 S., 128 Abb., br.

Früher € 39,95, jetzt € 19,95

ISBN 3-8274-1257-9



Rita L. Atkinson et al.

Hilgards Einführung in die Psychologie

>> Seit fast 50 Jahren ist Hilgards Einführung in die Psychologie *ein Lehrbuch-Klassiker. Das Buch bietet einen didaktisch vorbildlich gestalteten Überblick über die wichtigsten Lehr- und Prüfungsstoffe des Grundstudiums und die Kernthemen der Psychologie im Haupt- und Nebenfach. Es eignet sich insbesondere für Studenten der Lehramtsstudiengänge und der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften.<<*

Psychologie Verstehen

2001, 808 S., 360 Abb., geb.

Früher € 69,95, jetzt € 39,95

ISBN 3-8274-0489-4

Knut Schmidt-Nielsen

Physiologie der Tiere

Ein Grundlagenlehrbuch aus einem Guss und auf das Verständnis der Physiologie der Tiere hinsichtlich der sie beeinflussenden ökologischen Parameter ausgerichtet.

1999, 529 S., br.

Früher € 49,95, jetzt € 19,95

ISBN 3-8274-0562-9

H. H. Rashidi / L. K. Bühler

Grundriss der Bioinformatik

Ein hervorragendes, rechtzeitig zur aktuellen diskussion erschienenes leicht verständliches Buch für alle Fragen der Bioinformatik

2001, 215 S., 68 Abb., geb.

Früher € 34,95, jetzt € 19,95

ISBN 3-8274-1094-0

Jetzt als Studienausgabe!!

Volker Storch / Ulrich Welsch

Kurzes Lehrbuch der Zoologie

Dieses bewährte und erfolgreiche Werk gibt einen systematischen und konzentrierten Überblick über das Gesamtgebiet der Zoologie von der Zelle über die Organsysteme bis hin zur Entwicklung, Vererbung, Evolution, Ökologie sowie zur systematischen Zoologie.

593 S., 284 Abb., br.

Früher € 49,95, jetzt € 34,95

ISBN 3-8274-1428-8

»Eine gelungene Gesamtdarstellung!!
Nachr. aus der Chemie

Karl Cammann (Hrsg.)

Instrumentelle Analytische Chemie

>> Es ist zu hoffen, dass dieses Lehrbuch wegen der verständlichen Sprache, der sehr anschaulichen Bilder (manchmal direkt von Geräten) und übersichtlichen Tabellen, in der Lehre eingesetzt wird, um den Studierenden eine breite Grundlage der Analytischen Chemie zu vermitteln, die nichts mehr mit Trennungsgang zu tun hat. Altgediente Chemiker können mit Hilfe dieses Buches ihre analytische Allgemeinbildung mal wieder auf den neuesten Stand bringen.<<

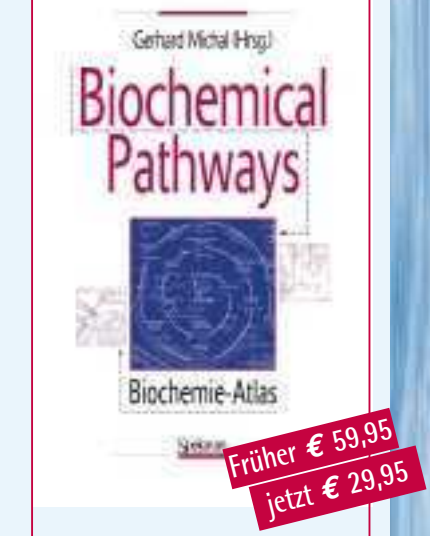
Mitteilungsblatt Gesell. Dt. Chemiker

2000, 604 S., 300 Abb., geb.

Früher € 79,95, jetzt: € 39,95

ISBN 3-8274-0057-0

Die gesamte Biochemie – nur € 29,95 !!



Gerhard Michal (Hrsg.)

Biochemical Pathways

Auf der Grundlage der weltbekannten "Biochemical Pathways", des "Boehringer-Posters", entstand dieses Buch. Beiträge renommierter Wissenschaftler behandeln sämtliche relevanten Themen aus dem Bereich Biochemie/ Molekularbiologie auf dem aktuellen Stand der Forschung. Eine Vielzahl 6-farbiger (!) Grafiken veranschaulicht die überaus komplexen biochemischen Vorgänge. Damit schlägt das Buch eine Brücke zwischen Lehrbuchstoff und Originalliteratur: als wertvolles Nachschlagewerk, als Überblick über die Zusammenhänge in einem höchst dynamischen Gebiet – eine Fundgrube für alle, die in den Biowissenschaften auf dem Laufenden bleiben müssen.

1998, 276 S., 220 Abb., geb.

Früher € 59,95, jetzt: € 29,95

ISBN 3-86025-239-9

Spektrum AKADEMISCHER VERLAG

Bestellen können Sie mit der Bestellkarte vorne im Heft ›› tel.: 07071/93 53 69 ›› per Fax: 07071/935393 ›› Mail: shop@spektrum-verlag.de

Macht gesunde Ernährung krank?

Die seit einem Jahrzehnt geltenden offiziellen Ernährungsempfehlungen haben sich als irreführend erwiesen. So sind manche der verteufelten Fette gesund, viele hochgelobte Kohlenhydrate dagegen nicht.

RICHARD BORGE

Von Walter C. Willett und Meir J. Stampfer

Vor elf Jahren gab das US-Landwirtschaftsministerium Ernährungsempfehlungen in Form einer Pyramide heraus. Sie waren als Leitfaden für Verbraucher gedacht, die etwas für ihre Gesundheit tun und chronischen Erkrankungen vorbeugen wollten. An der Basis der Pyramide standen Lebensmittel, die als uneingeschränkt gesund eingestuft wurden. Sie sollten den Hauptteil des Speisezettels bilden. Zur Spitze hin folgten zunehmend problematische Nahrungsmittel, deren Anteil an der insgesamt konsumierten Menge entsprechend niedriger angesetzt wurde.

Die Empfehlungen der Pyramide wurden rasch Allgemeingut: wenig Fette und Öle, dafür pro Tag sechs bis elf Rationen Nahrungsmittel, die viel komplexe Kohlenhydrate enthalten – Brot, Reis, Nudeln und so weiter; ergänzend dazu größere Mengen an Gemüse (darunter auch Kartoffeln, eine weitere Quelle komplexer Kohlehydrate), Früchten und Milchprodukten. Auf dem idealen Speisezettel standen auch täglich mindestens zwei Rationen aus der Gruppe Fleisch und Bohnen, in der rotes Fleisch mit Geflügel, Fisch, Nüssen, Hülsenfrüchten und Eiern zusammengefasst sind.

Schon als die Ernährungspyramide entwickelt wurde, war seit längerem bekannt, dass der Konsum bestimmter Fette zur Erhaltung der Gesundheit unverzichtbar ist und das Risiko von Herz-Kreislauf-Erkrankungen senken kann. Umgekehrt gab es kaum Hinweise darauf, dass der Verzehr großer Mengen an Kohlenhydraten gesund sei. Seither mehren sich Forschungsergebnisse, wonach die Ernährungspyramide grobe Fehler enthält. Mit dem Aufruf zum Verzehr komplexer Kohlenhydrate unter Verzicht auf praktisch sämtliche Fette führt sie jedenfalls in die Irre; denn nicht alle Fette sind schädlich und keineswegs alle komplexen Kohlenhydrate gut für die Gesundheit.

Das Zentrum für Ernährungspolitik und Gesundheitsförderung des US-Landwirtschaftsministeriums prüft derzeit die einstigen Empfehlungen. Eine Revision ist allerdings nicht vor 2004 zu erwarten. Deshalb haben wir jetzt schon eine neue, modifizierte Pyramide entwickelt, die dem heutigen Kenntnisstand über die Zusammenhänge von Ernährung und Gesundheit besser entspricht. Eigenen Studien von uns zufolge kann eine Ernährung gemäß den überarbeiteten Empfehlungen das Risiko von Herz-Kreislauf-Erkrankungen bei Männern und Frauen deutlich senken.

Weshalb ist die alte Ernährungspyramide so mangelhaft? Zum einen begingen ihre Schöpfer den Fehler, sie zu stark zu vereinfachen. Schon seit Jahrzehnten war bekannt, dass Fette mit gesättigten Fettsäuren – in größeren Mengen vor allem in rotem Fleisch und Milchprodukten enthalten – den Cholesterinspiegel im Blut erhöhen. Hohe Cholesterinwerte wiederum ▷

Sanierungsfall: Die bisherige Ernährungspyramide muss wegen grober Fehler und Konstruktionsmängel abgerissen und neu gebaut werden.

ZEFA / N. SCHÄFER

Übergewicht zählt zu den größten Gesundheitsrisiken. Milchprodukte und Kohlenhydrate in leicht verdaulicher Form sind die Hauptverursacher.

▷ steigern das Risiko für koronare Herzkrankheiten, also Herzinfarkte und andere Erkrankungen, die durch eine Verengung der Herzkranzarterien bedingt sind. In den 1960er Jahren belegten kontrollierte Ernährungsstudien, deren Teilnehmer sich über mehrere Wochen an eine bestimmte Diät hielten, dass gesättigte Fettsäuren den Cholesterinspiegel erhöhen, mehrfach ungesättigte ihn dagegen senken. Daher empfahlen Ernährungswissenschaftler in den 1960er und 1970er Jahren dringend, gesättigte Fettsäuren durch ungesättigte zu ersetzen. Die Amerikaner verdoppelten daraufhin ihren Verzehr an ungesättigten Fettsäuren, die vor allem in Pflanzenölen und Fisch vorkommen. Dies dürfte wesentlich dazu beigetragen haben, die Häufigkeit koronarer Herzkrankheiten in den 1970er und 1980er Jahren zu halbieren.

Woher rührt dann die Annahme, dass es besser sei, Fett generell zu meiden? Sie beruht hauptsächlich auf der Feststellung, dass koronare Herzkrankheiten in den westlichen Industrieländern mit ihrer fettreichen Kost häufig sind. Diese Korrelation gilt aber nur für Fette mit gesättigten Fettsäuren. In Populationen, die relativ große Mengen einfach und mehrfach ungesättigter Fettsäuren zu sich nehmen, treten koronare Herzkrankheiten tendenziell seltener auf. Die Bewohner der griechischen Insel Kreta verzehren zum Beispiel viel Olivenöl (das reich an einfach ungesättigten Fettsäuren ist) und Fisch (der viel mehrfach ungesättigte Fettsäuren enthält). Obwohl so 40 Prozent der Kalorien aus Fetten stammen, leiden die Kreter sogar weniger an Herzkrankheiten als Bevölkerungsgruppen, die nach der traditionellen japanischen Diät leben, in der Fette nur 8 bis 10 Prozent der Kalorien stellen. Internationale Vergleiche können jedoch irreführend sein, da mit der westlichen Lebensweise auch viele andere Faktoren verbunden sind, die sich ungünstig auf die Gesundheit auswirken – darunter Rauchen, Bewegungsmangel und hoher Fettanteil am Körpergewicht.

Leider dachten viele Ernährungswissenschaftler, dass es zu schwierig sei, die Öffentlichkeit so differenziert zu unterrichten. Stattdessen wurde die simple Parole ausgegeben: »Fett ist schlecht.« Da Fette mit gesättigten Fettsäuren etwa 40 Prozent der konsumierten Gesamtfettmenge ausmachten, ging das Landwirtschaftsministerium davon aus, dass das Propagieren einer fettarmen Kost zwangsläufig auch den Verzehr gesättigter Fettsäuren senken würde. In das gleiche Horn blies bald auch die Lebensmittelindustrie, die nun fettarme Produkte mit viel fructosereichem Maissirup und anderen süß schmeckenden Inhaltsstoffen zu vermarkten begann.

Als die Ernährungspyramide entwickelt wurde, stammten etwa 40 Prozent der Kalorien in der Kost eines typischen Amerikaners aus Fetten, 15 Prozent aus Proteinen und 45 Prozent aus Kohlenhydraten. Eine Empfehlung zu vermehrtem Proteinkonsum wollten die Ernährungsphysiologen nicht aussprechen, da viele Proteinquellen – zum Beispiel rotes Fleisch – auch reich an gesättigten Fettsäuren sind. Die Botschaft »Fett ist schlecht« führte so zwangsläufig zu dem Schluss »Kohlenhydrate sind gut«. Die American Heart Association empfahl, mindestens 50 Prozent des Kalorienbedarfs mit Kohlenhydraten und höchstens 30 Prozent mit Fetten zu decken. Diese 30-Prozent-Grenze entwickelte sich zum Credo der Ernährungswissenschaftler. Der gesundheitsbewusste Verbraucher musste daher annehmen, viele Studien hätten bewiesen, dass Menschen, die wenig Fett essen, gesünder sind. In Wahrheit gibt es keine einzige Untersuchung, die einen langfristigen gesundheitlichen Nutzen belegt, der unmittelbar einer fettarmen Diät zuzuschreiben wäre. Die 30-Prozent-Grenze für Fett war also im Grunde aus der Luft gegriffen.

Eine Milchmädchenrechnung

Der Sinn dieser Empfehlungen geriet noch mehr in Zweifel, als Forscher herausfanden, dass die beiden Cholesterin-Transporter im Blut konträre Effekte auf das Risiko von Herzkrankheiten haben. Heute sind das LDL (*low-density lipoprotein*, Lipoprotein geringer Dichte) und das HDL (*high-density lipoprotein*, Lipoprotein hoher Dichte) auch der Öffentlichkeit als schlechtes beziehungsweise gutes Cholesterin ein Begriff. Erhöht man das Verhältnis von LDL zu HDL im Blut, so steigt das koronare Risiko, erniedrigt man den LDL/HDL-Quotienten, nimmt es ab.

Anfang der 1990er Jahre hatten kontrollierte Ernährungsstudien gezeigt, dass der LDL-Spiegel sinkt, wenn man den Kalorienbedarf mit Kohlenhydraten statt gesättigten Fettsäuren deckt – allerdings sinkt dann auch der HDL-Spiegel. Da sich der LDL/HDL-Quotient nicht ändert, reduziert sich das Risiko koronarer Erkrankungen kaum. Kohlenhydratreiche Kost erhöht andererseits den Gehalt des Blutes an Triglyceriden, den Hauptbestandteilen von normalem Fett. Dieser Effekt ist wahrscheinlich hormonell bedingt. Hohe Triglycerid-Spiegel begünstigen jedoch das Auftreten von Herzkrankheiten.

Die Folgen der empfohlenen Kostumstellung sind noch fataler, wenn dabei Fette mit einfach oder mehrfach ungesättigten Fettsäuren durch Kohlenhydrate ersetzt werden: Der LDL-Spiegel steigt, während der HDL-Spiegel fällt. Der Cholesterinquotient verschiebt sich also in ungünstiger Richtung. Dagegen verbessert er sich

IN KÜRZE

▶ Die 1992 vom US-Landwirtschaftsministerium herausgegebene **Ernährungspyramide** empfiehlt, Fett zu meiden und vor allem kohlenhydratreiche Nahrungsmittel wie Brot, Getreideflocken, Reis und Nudeln zu essen. Ziel ist, die Aufnahme gesättigter Fettsäuren zu drosseln, die den **Cholesterinspiegel** erhöhen.

▶ Inzwischen haben wissenschaftliche Untersuchungen jedoch gezeigt, dass der Verzehr großer Mengen raffinierter **Kohlenhydrate** in Nahrungsmitteln wie Weißbrot, Nudeln oder geschältem Reis den **Blutzucker- und Insulinspiegel** ungünstig beeinflusst. Nimmt man stattdessen gesunde Fette – mit ungesättigten Fettsäuren – zu sich, erniedrigt sich das Risiko von **Herzerkrankungen**.

▶ Die Autoren propagieren deshalb eine überarbeitete Ernährungspyramide, die den Verzehr von gesunden Fetten und **Vollkornprodukten** bei weitgehendem Verzicht auf rotes Fleisch und raffinierte Kohlenhydrate empfiehlt.

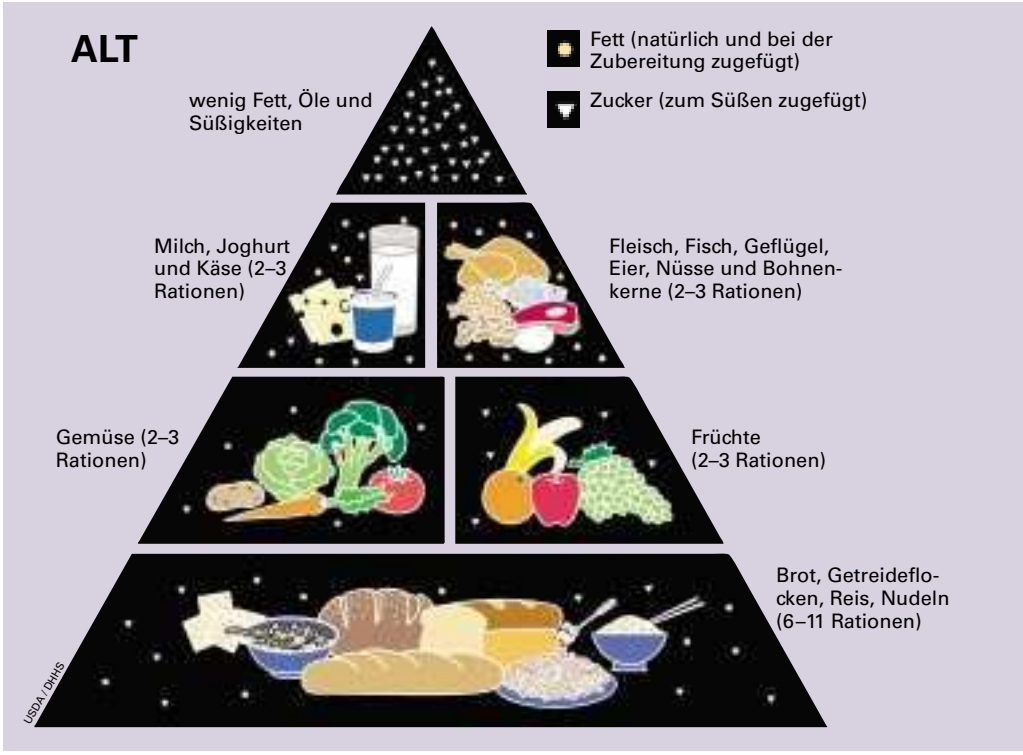
beim Übergang von gesättigten zu einfach oder mehrfach ungesättigten Fettsäuren.

Deutlich schädlicher als Kohlenhydrate sind nur noch die trans-ungesättigten Fettsäuren, die bei der teilweisen Hydrierung von Pflanzenölen zum Zweck ihrer Verfestigung entstehen und in vielen Margarine-Produkten, Backwaren und frittierten Speisen enthalten sind. Sie erhöhen die Blutspiegel von LDL und Triglyceriden, während sie den HDL-Spiegel senken.

Über die gesundheitlichen Auswirkungen einer bestimmten Kost entscheiden allerdings nicht nur der Cholesterinquotient und der Triglycerid-Spiegel. Andere Faktoren spielen auch eine Rolle. Nahrungsbestandteile können Herz-Kreislauf-Erkrankungen auf vielerlei Arten begünstigen – etwa indem sie den Blutdruck oder die Gerinnungsneigung des Blutes erhöhen. Andere Inhaltsstoffe schützen über besondere Mechanismen vor Herzkrankheiten. So vermindern Omega-3-Fettsäuren (aus Fisch und einigen Pflanzenölen) das Risiko des Kammerflimmerns – einer Herzrhythmusstörung, die zum Sekundenherztod führen kann.

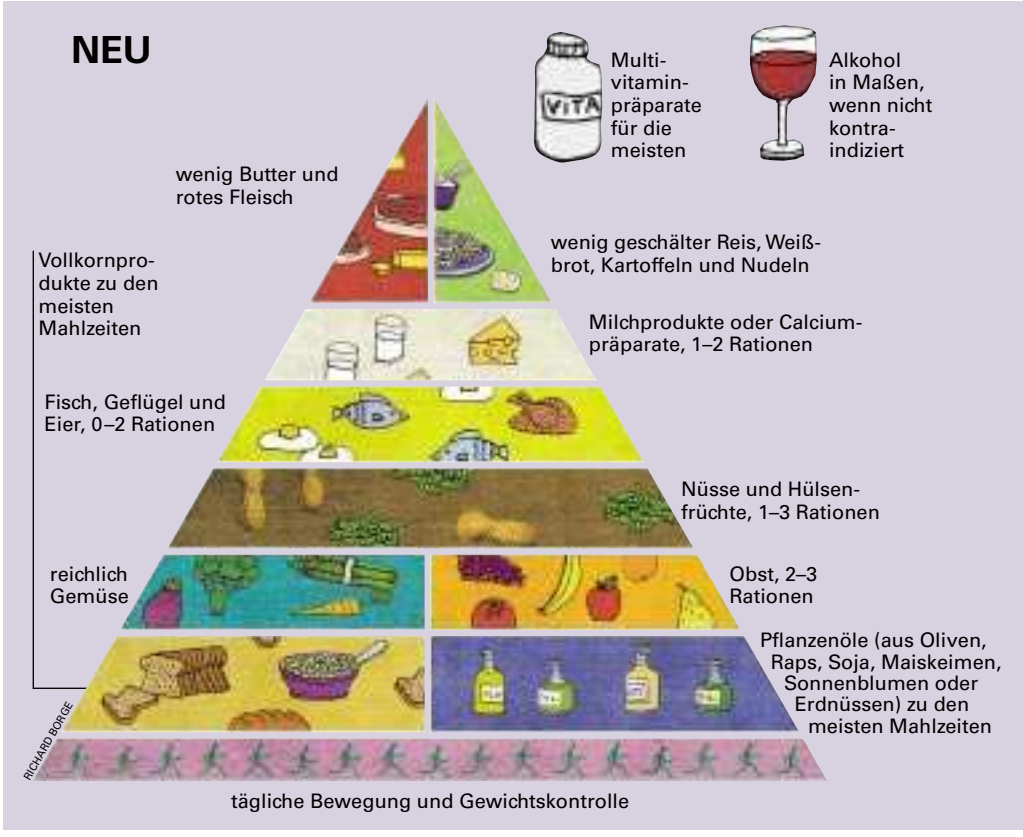
Das ideale Mittel, die Effekte verschiedener Ernährungsweisen zuverlässig zu bestimmen, sind große Langzeitstudien, deren Teilnehmer nach dem Zufallsprinzip einer der beiden getesteten Kostformen zugeteilt und dann über viele Jahre beobachtet werden. Allerdings ließen sich bisher nur wenige solche Untersuchungen durchführen, da sie sehr aufwendig und teuer sind. Die Teilnehmer waren zudem meist Patienten, die bereits an einer Herzkrankheit litten. Trotz dieser Einschränkungen stützen die Ergebnisse die These, dass es sich günstig auswirkt, gesättigte Fettsäuren durch ungesättigte zu ersetzen, nicht aber durch Kohlenhydrate.

Die beste Alternative zu solchen Interventionsstudien sind große epidemiologische Untersuchungen, bei denen in regelmäßigen Intervallen die Ernährungsweise ausgedehnter Personengruppen abgefragt und mit der Häufigkeit von Erkrankungen des Herzens und anderer Organsysteme in Beziehung gesetzt wird. Ein bekanntes Beispiel einer solchen prospektiven Kohortenstudie ist die seit 1976 laufende Nurses Health Study, an der viele tausend amerikanische Krankenschwestern teilnehmen. In der Absicht begonnen, die gesundheitlichen Effekte von hormonellen Verhütungsmitteln zu erforschen, wurde sie bald auf Ernährungsfragen ausgedehnt. Eine Arbeitsgruppe der Harvard-Universität ▷



Die Ernährungspyramide des US-Landwirtschaftsministeriums vermittelt als zentrale Botschaft: Fette sind schlecht, Kohlenhydrate gut. Diese Aussage ist zu vereinfacht, ja irreführend. Als Ration gilt etwa eine Scheibe Brot, eine Tasse Milch, ein Ei oder eine Banane.

Die von den Autoren entwickelte neue Ernährungspyramide unterscheidet zwischen gesunden und ungesunden Fetten und Kohlenhydraten. Der Verzehr von Obst und Gemüse wird weiterhin empfohlen, der von Milchprodukten sollte jedoch eingeschränkt werden.



▷ in Cambridge (Massachusetts) hat Daten von etwa 90 000 Teilnehmerinnen der Studie ausgewertet, die seit 1980 regelmäßig Fragebögen zu ihrer Ernährungsweise ausfüllten. Außerdem bezog das Team die Daten von mehr als 50 000 männlichen Teilnehmern der 1986 begonnenen Health Professionals Study in die Analyse ein.

Nachdem die Auswirkungen von Rauchen, Bewegungsmangel und anderen anerkannten Risikofaktoren berücksichtigt worden waren, zeigte sich ein klarer Einfluss der konsumierten Fettsäuren auf die Häufigkeit von Herz-Kreislauf-Erkrankungen bei den Teilnehmern. Gesättigte Fettsäuren erhöhen demnach die Rate, Trans-Fettsäuren sogar erheblich, während einfach und mehrfach ungesättigte Fettsäuren sie senken – genau so, wie die Ergebnisse der kontrollierten Ernährungsstudien erwarten ließen. Da sich die einzelnen Effekte die Waage halten, wirkt sich ein gesteigerter Gesamtkonsum an Fett nicht negativ aus. Das bestätigt die Schlussfolgerungen eines Berichts der National Academy of Sciences der USA von 1989, wonach der Gesamtfettkonsum kein unabhängiger Risikofaktor für Herzkrankheiten ist.

Wie aber steht es mit anderen Erkrankungen? Da Brustkrebs, Dickdarm- und Prostatakarzinome in den wohlhabenden westlichen Ländern häufig sind, galt der gesteigerte Fettkonsum, besonders aber der Verzehr tierischer Fette auch als möglicher Risikofaktor für Krebs. Große epidemiologische Studien lieferten jedoch kaum Anhaltspunkte dafür – zumindest bei Brust- oder Darmkrebs. Einige Untersuchungen ergaben zwar Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen der Häufigkeit von Prostatakarzinomen und dem Verzehr tierischer Fette, erfreulicherweise fanden sich jedoch keine Anhaltspunkte, dass der Konsum von Pflanzenölen die Anfälligkeit für irgendeinen Krebs erhöhen könnte; er senkt sie einigen Studien zufolge sogar leicht. Daher erscheint es sinnvoll, Entscheidungen über die Zusammensetzung der Nahrungsfette nach dem Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen auszurichten und nicht nach dem für Krebs.

ZEFA

Auch in großen Mengen ausgesprochen gesund: Olivenöl mit seinen einfach ungesättigten Fettsäuren

GLOSSAR

Epidemiologie: untersucht die raumzeitliche Verteilung von Erkrankungen in einer Population und analysiert die Faktoren, die diese Verteilung beeinflussen.

Kohortenstudie: mehrjährige Registrierung von Lebensstil und auftretenden Krankheiten in einer großen Stichprobe aus der Bevölkerung.

Interventionsstudie: untersucht die Effekte einer gesundheitlichen Empfehlung oder Vorbeugungsmaßnahme durch Vergleich der Erkrankungshäufigkeit in einer Personengruppe, die dieser Empfehlung folgt, mit derjenigen in einer unbeeinflussten Kontrollgruppe.

Prospektive Studie: verfolgt das Auftreten von Krankheiten in einer ausgewählten Bevölkerungsgruppe im Hinblick auf bestimmte Risikofaktoren.

Retrospektive Studie: sucht in der Vergangenheit von Personen mit einer bestimmten Erkrankung nach möglichen ursächlichen Faktoren.

Risikofaktor Übergewicht

Natürlich muss auch der Einfluss des Fettkonsums auf das Körpergewicht berücksichtigt werden. In den USA stellt Übergewicht das schwerste ernährungsbedingte Gesundheitsproblem dar. Es bildet einen wichtigen Risikofaktor für viele Erkrankungen wie Diabetes mellitus vom Typ II (»Erwachsenen-Diabetes«), koronare Herzkrankheiten sowie Tumoren der Brust, des Dickdarms, der Nieren und der Speiseröhre. Viele Ernährungswissenschaftler sind der Meinung, dass Fettkonsum eher zu Übergewicht führt als der Verzehr von Proteinen oder Kohlenhydraten, da Fett einfach mehr Kalorien enthält. Außerdem ist es für den Organismus vermutlich einfacher, Fette direkt einzulagern, als Kohlenhydrate erst in Körperfett umzuwandeln.

Jüngste kontrollierte Ernährungsstudien haben jedoch gezeigt, dass diese Erwägungen kaum eine praktische Rolle spielen. Das beste Mittel gegen Übergewicht ist, die Kalorienzufuhr insgesamt zu begrenzen und nicht nur den Fettkonsum. Die eigentliche Frage lautet somit: Beeinflusst der Fettanteil der Nahrung die Fähigkeit, nur die benötigte Menge an Kalorien aufzunehmen? Macht Fett also hungriger oder satter als Protein oder Kohlenhydrate?

Über die Vorzüge oder Nachteile verschiedener Ernährungsweisen gibt es zahllose Theorien, aber so gut wie keine langfristigen Untersuchungen. Die meisten Teilnehmer von Interventionsstudien, die fettarme Diäten aßen, nahmen in den ersten Monaten einige Pfund ab, erreichten später jedoch wieder ihr Ausgangsgewicht. In langfristigen Untersuchungen von über einem Jahr Dauer hatte fettarme Ernährung durchweg keinen erkennbaren Einfluss auf das Körpergewicht.

Betrachten wir nun die gesundheitlichen Effekte von Kohlenhydraten. Diese kommen in zwei Formen vor. Komplexe Kohlenhydrate (Polysaccharide) bestehen aus langen Ketten von Zuckereinheiten wie Glucose oder Fructose. Einfache Zucker enthalten dagegen nur eine oder zwei solche Einheiten. Weil sie reine Kalorienbomben sind, wählte das US-Landwirtschaftsministerium als Basis der Ernährungspyramide lieber die komplexen Vertreter, die in üblichen Nahrungsmitteln zusammen mit Vitaminen, Mineralien und Ballaststoffen vorkommen.

Bei der Verfeinerung kohlenhydratreicher Ausgangsmaterialien – etwa zu Weißbrot oder geschältem Reis – werden jedoch genau diese wertvollen Nebenbestandteile weitgehend entfernt. Übrig bleibt fast reine Stärke: ein leicht verdauliches Polysaccharid, das im Körper sehr rasch in Glucose zerlegt wird. Aus diesem Grund erhöhen die raffinierten Getreideprodukte die Glucosekonzentration im Blut (den Blutzuckerspiegel) wesentlich schneller als Erzeugnisse aus Vollkorn, das nicht in feines Mehl zermahlen wurde. Sie haben, wie wir sagen, einen hohen glykämischen Index.

Betrachten wir Kartoffeln als weiteres Beispiel. In gekochter Form lassen sie den Glucosespiegel im Blut sogar noch rascher ansteigen, als wenn man die gleiche Kalorienmenge in Form von handelsüblichem Zucker (Rohrzucker oder Saccharose) zu

sich nimmt. Kartoffeln enthalten nämlich hauptsächlich Stärke, die schnell zu Glucose abgebaut wird. Rohrzucker hingegen ist ein Disaccharid, das aus je einem Glucose- und einem Fructosemolekül besteht. Zur Verwertung muss die Fructose im Körper erst in Glucose umgewandelt werden. Daher nimmt der Blutzuckerspiegel beim Verzehr von Saccharose langsamer zu.

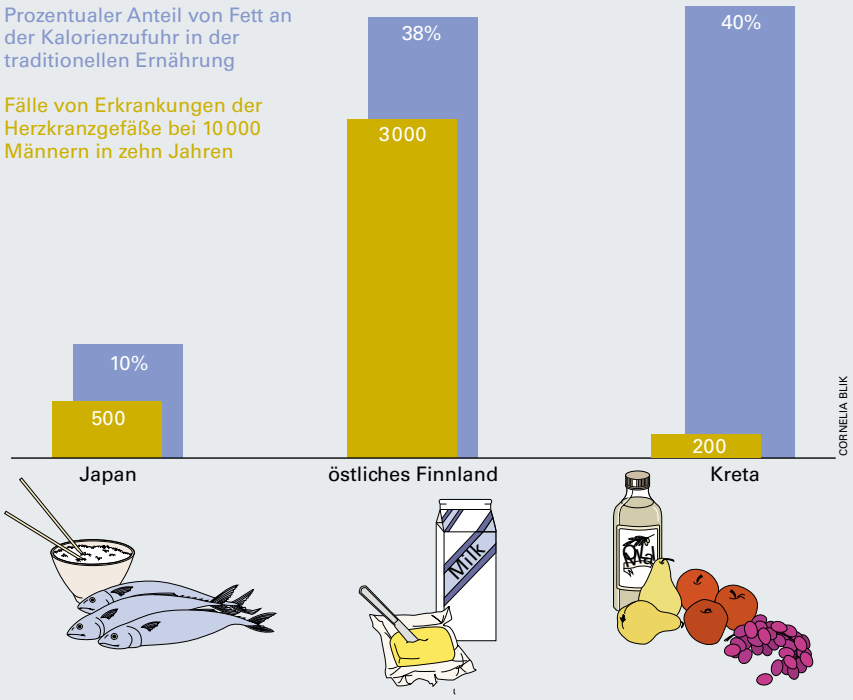
Als Reaktion auf einen raschen Anstieg der Konzentration von Zucker im Blut wird relativ viel Insulin freigesetzt, das die Aufnahme von Glucose in Leber- und Muskelzellen stimuliert. Dadurch sinkt der Blutzuckerspiegel rasch wieder ab – gelegentlich bis unter den Ausgangswert. Große Mengen an Glucose und Insulin im Blut können negative Auswirkungen auf Herz und Kreislauf haben, weil sie die Konzentration an Triglyceriden erhöhen und die an HDL (dem »guten« Cholesterin) erniedrigen. Der insulinbedingte Abfall des Blutzuckerspiegels nach einer kohlenhydratreichen Mahlzeit verursacht wieder Hungergefühle. Dadurch kann er zu übermäßigem Essen verleiten und Übergewicht fördern.

Unsere epidemiologischen Studien ergaben, dass sich bei vermehrtem Konsum von Stärke aus raffinierten Getreideprodukten oder Kartoffeln das Risiko für Typ-II-Diabetes und koronare Herzkrankheiten erhöht. Dagegen verringert es sich bei gesteigerter Aufnahme von Ballaststoffen. Anders als früher vermutet, sinkt allerdings nicht zugleich auch das Darmkrebsrisiko.

Übergewicht und Bewegungsmangel können zu einer Insulinresistenz führen. Der Körper braucht dann größere Mengen des Hormons, um den Blutzuckerspiegel zu regulieren. Nach neueren Erkenntnissen treten bei Menschen mit beginnender Insulinresistenz verstärkt unerwünschte Stoffwechselreaktionen nach kohlenhydratreichen Mahlzeiten auf. Das könnte erklären, weshalb asiatische Bauern, die sehr mager und körperlich aktiv sind, große Mengen raffinierter Kohlenhydrate verzehren können, ohne Diabetes oder Herzkrankheiten zu entwickeln, während dieselbe Ernährung bei Bevölkerungsgruppen mit bewegungsarmer Lebensweise verheerende Effekte hat.

Der wohl unstrittigste Aspekt der Ernährungspyramide ist die Empfehlung, viel Obst und Gemüse zu essen. Das senke, so die meistgenannte Begründung, das Krebsrisiko. Die Belege für diese Aussage stammen allerdings vorwiegend aus Fallkontrollstudien, bei denen Krebspatienten und ausgewählte, nicht erkrankte Kontrollpersonen nach ihren früheren Essgewohnheiten befragt wurden. Dieser retrospektive Ansatz birgt viele Fehlerquellen.

Fettkonsum und Herzerkrankungen



Bei internationalen Vergleichen zeigt sich, dass nicht der gesamte Fettkonsum, sondern die Art der verzehrten Fette entscheidend für das Risiko einer Herzerkrankung ist. In Regionen wie Ostfinnland, wo gesättigte Fette traditionell einen Großteil der Nahrung bilden, sind Herzkrankheiten viel häufiger als in Gegenden, wo einfach ungesättigte Fettsäuren auf dem Speisezettel vorherrschen. Die auf Kreta übliche mediterrane Kost scheint trotz ihres hohen Fettanteils sogar noch gesünder für das Herz zu sein als die traditionelle fettarme Ernährung der Japaner.

Wie gesund sind Obst und Gemüse?

Tatsächlich zeigen aktuelle Daten aus prospektiven Studien (darunter unserer eigenen) kaum einen Zusammenhang zwischen dem Gesamtkonsum an Obst und Gemüse und der Häufigkeit von Krebserkrankungen. Einzelne Inhaltsstoffe von Früchten und Gemüsen mögen jedoch durchaus eine Schutzwirkung haben. Zum Beispiel könnte die Folsäure in Blattgemüsen das Risiko von Darmkrebs und der Farbstoff Lycopin in der Tomate das eines Prostatakarzinoms mindern.

Der Hauptnutzen einer obst- und gemüsereichen Kost ist jedoch, dass sie koronaren Herzerkrankungen vorbeugt. Eine Reihe epidemiologischer Untersuchungen hat dies belegt. Folsäure und Kalium scheinen maßgeblich an dem Effekt beteiligt zu sein. Ein Folsäuremangel bei Schwangeren birgt außerdem ein erhöhtes Risiko schwerer Missbildungen beim Fötus, während die ungenügende Zufuhr von Lutein, einem Pigment in grünen Blattgemüsen, die Wahrscheinlichkeit für grauen Star und Retinadegeneration steigert.

Obst und Gemüse sind außerdem reich an vielen lebenswichtigen Vitaminen. Auch wenn die prophylaktische Wirkung gegen Krebs gering sein mag, gibt es also gute Gründe, die Empfehlung zu fünf Rationen Obst und Gemüse täglich einzuhalten. Allerdings sollte man, abweichend von der Ernährungspyramide des US-Landwirtschaftsministeriums, Kartoffeln dabei meiden, da sie zum großen Teil aus Stärke bestehen und nicht die gesundheitlichen Vorteile anderer Gemüsearten aufweisen.

Ein weiterer Mangel der 1992 veröffentlichten Pyramide ist, dass sie die beträchtlichen gesundheitlichen Unterschiede zwischen rotem Fleisch (Rind, Schwein, Schaf) und anderen Nahrungsmitteln (Ge- ▷

ZEFA / RYMAN CABANNES

Fisch mit seinem hohen Gehalt an mehrfach ungesättigten Fettsäuren und Gemüse, das reich an Vitaminen, Mineralien und Ballaststoffen ist, sollten den Speisezettel dominieren.

▷ flügel, Fisch, Bohnen, Eier) ignoriert, die in der Fleisch-und-Bohnen-Gruppe zusammengefasst sind. Studien zufolge birgt rotes Fleisch ein erhöhtes Risiko für koronare Herzkrankheiten – wohl wegen seines beträchtlichen Gehalts an gesättigten Fettsäuren und Cholesterin. Zudem steigert es die Wahrscheinlichkeit für Diabetes mellitus Typ II und Darmkrebs. Das erhöhte Tumorrisiko könnte teilweise von Karzinogenen herrühren, die beim Anbraten entstehen, oder von den Chemikalien, die zur Herstellung von Wurstwaren dienen.

Geflügel und Fisch hingegen enthalten weniger gesättigte und mehr ungesättigte Fettsäuren als rotes Fleisch. Fisch ist zudem reich an essenziellen Omega-3-Fettsäuren. In Einklang damit haben Studien ergeben, dass eine Umstellung von rotem Fleisch auf Huhn und Fisch das Risiko für koronare Herzkrankheiten und Darmkrebs senkt. Eier enthalten viel Cholesterin, der Verzehr von bis zu einem Ei pro Tag beeinflusst ▷

Kommentare

Für eine fundierte Ernährungsberatung

Die offiziellen nationalen Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung stimmen in den Grundzügen mit denen überein, die das US-Landwirtschaftsministerium in seiner Ernährungspyramide gibt. Deshalb gelten die kritischen Anmerkungen von Willett und Stampfer mit leichten Modifikationen auch für Deutschland. Ein Ernährungsphysiologe und ein Epidemiologe bewerten sie hier aus heimischer Sicht.

Ungerechtfertigte Verteufelung der Kartoffel

Die Arbeitsgruppen von Walter C. Willett und Meir J. Stampfer an der Harvard School of Public Health haben sich durch ihre wegweisenden Untersuchungen zur Epidemiologie ernährungsabhängiger Krankheiten bleibende Verdienste erworben. Und so treffen weite Teile ihrer hier ausgeführten Anregungen auf breite Zustimmung der Wissenschaftlergemeinschaft auch in Deutschland. Dies gilt etwa für die Empfehlung, sich überwiegend von Vollkornprodukten zu ernähren und vor allem Fette mit hohem Gehalt an Omega-3-Fettsäuren zu verzehren, die in Pflanzenölen und Fischen vorkommen.

Problematisch ist jedoch, wenn Nahrungsmittel verdammt oder empfohlen werden, obwohl sich in prospektiven Kohortenstudien kein Einfluss ihres Verzehrs auf die Gesundheit nachweisen ließ. Das gilt etwa für Gemüse und Obst, bei dem die Nurses Health Study keinen Hinweis darauf liefert, dass sie Dickdarmkrebs vorbeugen. Einen solchen positiven Effekt zeigt jedoch die europäische EPIC-Untersuchung *(European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition)*. Für ihn sprechen auch experimentelle Erkenntnisse zur Wirkung von Inhaltsstoffen pflanzlicher Lebensmittel auf die Zellbiologie des Dickdarm-Epithels und seiner bösartigen Transformation bei Krebs.

Offenbar stößt die Aussagekraft der Epidemiologie da an ihre Grenzen, wo – wie in der homogenen US-amerikanischen gastronomischen Kultur – die verzehrte Menge einer bestimmten Nahrungsmittelsorte in der Bevölkerung nicht stark divergiert. Dem steht eine beträchtliche Spannbreite in Europa gegenüber, wo die täglich konsumierten Mengen an Gemüse und Obst bei Männern von 225 Gramm in Nordschweden (Umea) bis 627 Gramm in Sizilien (Ragusa) reichen.

Deshalb lässt sich auch der fehlende Zusammenhang zwischen der Aufnahme von Nahrungsfett und Fettsucht in der Nurses Health Study nicht verallgemeinern. Arbeiten in mehreren Laboratorien haben übereinstimmend gezeigt, dass das Risiko der Fettanhäufung im Körper sehr wohl mit dem Gesamtfett in der Nahrung steigt. Umgekehrt ergaben 16 kontrollierte Studien, dass eine Fettreduktion in der Diät Übergewicht mindert. Deshalb ist es heute in der Stoffwechselforschung unumstritten, dass die Tendenz zur Fettspeicherung im Körper von drei Determinanten des Lebensstils bestimmt wird (wenn man von genetisch fixierten Neigungen absieht): der Gesamtenergieaufnahme, dem prozentualen Fettanteil der Nahrung und der körperlichen Aktivität.

Diese Erkenntnisse beruhen auf biochemischen Daten, die von führenden Stoffwechselforschern weltweit erarbeitet wurden und so verschiedene Gebiete der Physiologie umfassen wie Hunger-Sättigungsmechanismen, den Stoffwechsel von Kohlenhydraten und Fetten im Körper sowie die Beziehungen zwischen Fettaufnahme und Fettoxidation. Offenbar sind sie noch zu neu, um in allen Zirkeln der Ernährungswissenschaft geziemend gewürdigt zu werden.

In ihrem Licht erscheint es jedenfalls äußerst bedenklich, wenn Willett und Stampfer einem unbegrenzt hohen Fettverzehr das Wort reden. Zahlreiche Daten aus der experimentellen Ernährungsforschung, seien sie im Reagenzglas oder am ganzen menschlichen Organismus gewonnen, deuten bei einer übermäßigen Aufnahme von Fetten – und zwar besonders von solchen mit mehrfach ungesättigten Fettsäuren – darauf hin, dass der »oxidative Stress« bedenklich zunimmt.

Die deutsche Position in Sachen gesunde Ernährung wird auf Veranlassung der Bundesregierung durch die Deutsche Gesellschaft für Ernährung erarbeitet. Deren Empfehlungen, die in einem

Ernährungskreis zusammengefasst sind, erwachsen aus einem ständigen Dialog zwischen experimentell und klinisch tätigen Ernährungswissenschaftlern mit Epidemiologen. Dadurch wird der Gefahr einer einseitig epidemiologischen Sichtweise begegnet, der Willett und Stampfer erliegen. Die von ihnen vorgebrachten Argumente sind der Deutschen Gesellschaft für Ernährung schon seit längerem bekannt. Dennoch sah sie bisher keine Veranlassung, sich beispielsweise von der Empfehlung zu verabschieden, magere Milchprodukte zu verzehren; denn zahlreiche klinisch-experimentelle Daten sprechen für eine reichliche Calciumzufuhr zur Osteoporose-Prophylaxe. Auch ein Grundnahrungsmittel wie die Kartoffel vom Teller zu verbannen, erscheint nicht gerechtfertigt; schließlich findet Willetts Methode, einen globalen »glykämischen Index« der Ernährung zu berechnen, keineswegs die ungeteilte Zustimmung der Stoffwechselphysiologen.

Prof. Dr. med. Christian Barth

Der Autor ist Vorsitzender des Vereins für Nutrigenomik und war von 1992 bis 2001 wissenschaftlicher Direktor des Deutschen Instituts für Ernährungsforschung in Bergholz-Rehbrücke.

Wissenslücken lieber eingestehen

Willett und Stampfer hinterfragen die präventive Wirksamkeit der 1992 vom US-Landwirtschaftsministerium herausgegebenen Ernährungspyramide. Diese gilt wie der Ernährungskreis der Deutschen Gesellschaft für Ernährung als offizielle nationale Empfehlung für eine auf Gesundheit und Krankheitsprävention ausgerichtete Lebensmittelauswahl. Auf Dauer werden solche Empfehlungen aber nur dann Gehör finden, wenn dahinter ein stichhaltiger Nachweis mit hoher Beweiskraft (Evidenz) steht. Sowohl die bisherige Ernährungspyramide als auch die von Willett und Stampfer vorgeschlagene Neufassung lassen diesen Nachweis in einigen Punkten vermissen.

Zu den evidenzgeleiteten Bewertungen zählen die »Handbooks For Cancer Prevention« der International Agency for Research on Cancer und die Empfehlungen einiger Organisationen wie der National Institutes of Health der USA oder wissenschaftlicher Fachgesellschaften wie der American Cancer Society und der Diabetesgesellschaften. Insgesamt lassen sie folgende Strukturelemente einer wirksamen Prävention chronischer Erkrankungen durch Ernährung und mit ihr zusammenhängende Faktoren erkennen:

- Eine überragende Bedeutung kommt der körperlichen Aktivität zu; das gilt für Diabetes mellitus, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Krebs.
- Die langfristige Kontrolle des zunächst erreichten adulten Normalgewichts hilft chronische degenerative Erkrankungen vermeiden.
- In den mit Mikronährstoffen wie Vitaminen gut versorgten westlichen Bevölkerungen hat die Einnahme von Supplementen außer bei einigen Risikogruppen nur geringe präventive Wirkungen.
- Ein hoher Gemüse- und Obstverzehr wirkt vorbeugend gegen Krebs und Herz-Kreislauf-Erkrankungen.
- Ballaststoffreiche Getreideprodukte sind ebenfalls präventiv wirksam.

Demnach können körperliche Aktivität und Gewichtskontrolle das Risiko vieler chronischer Erkrankungen einschließlich Krebs stark verringern. Eine hohe Aufnahme an Gemüse und Obst ist ein weiteres wichtiges präventives Element. Diese Lebensmittel liefern einen großen Teil der benötigten Nährstoffe. Zu ihrer Zubereitung und Verfeinerung sollten vor allem mehrfach ungesättigte Öle und Fette dienen, die sich als günstig für die Gesundheit herausgestellt haben.

Eine maßvolle Zufuhr von Fleisch erscheint sinnvoll. Das gilt jedoch nicht für Fleischerzeugnisse wie Wurstwaren, die nach systematischen Übersichtsarbeiten auf Basis der bestehenden Studien das Krebsrisiko leicht erhöhen.

Fisch sollte Bestandteil einer ausgewogenen Ernährung sein, da er viel ungesättigte Fettsäuren und Vitamin D enthält. Nüsse haben zwar auch eine günstige Fettsäurenzusammensetzung, fördern jedoch eine Gewichtszunahme.

Nach dem Ernährungssurvey des Robert-Koch-Instituts von 1998 bilden Milchprodukte in der deutschen Bevölkerung die wichtigste Lebensmittelquelle – noch vor Brot, Fleisch oder Süßwaren: Sie sind für etwa 15 Prozent der Kalorien- und über 20 Prozent der Fettaufnahme verantwortlich. Angesichts der Unsicherheit über ihren präventiven Nutzen bieten sie somit ein Einsparpotenzial im Hinblick auf Fett und Kalorien – in Einklang mit den Empfehlungen von Willett und Stampfer.

Problematischer ist dagegen deren Vorschlag, den Verzehr von Grundnahrungsmitteln wie Kartoffeln, Nudeln und Weißbrot einzuschränken, die nach eigenen prospektiven Studien der beiden US-Forscher unabhängig vom Körpergewicht das Risiko für Diabetes mellitus und Herz-Kreislauf-Erkrankungen steigern. Dieser Effekt soll auf dem hohen »glykämischen Index« von raffinierten, leicht resorbierbaren Kohlenhydraten beruhen: Sie lassen den Blutspiegel an Glucose sehr schnell stark ansteigen – eine Herausforderung für den Insulin-Stoffwechsel, dessen Störung Erkrankungen wie Diabetes mellitus begünstigt.

Diese Theorie ist bisher jedoch wissenschaftlich schlecht abgesichert. Zudem ist unklar, ob die hohe Zufuhr von Lebensmitteln mit hohem glykämischen Index auch dann gesundheitsschädliche Wirkungen hat, wenn die Population normalgewichtig ist und sich körperlich betätigt.

Der aktuelle Stand der wissenschaftlichen Diskussion scheint es zu rechtfertigen, Teile der Ernährungspyramide offen zu lassen und sich bei der Lebensmittelauswahl auf die gut abgesicherten Fakten zu konzentrieren. Schon die bisher gewonnenen Erkenntnisse auch tatsächlich umzusetzen, stellt eine besondere Herausforderung dar. Ein offenes Konzept bietet zudem den Vorteil, dass ein gewisser Spielraum besteht, den energetisch notwendigen Ergänzungsbedarf an Lebensmitteln in der täglichen Ernährung nach dem hedonistischen Prinzip auswählen zu dürfen.

Dr. Heiner Boeing

Der Autor ist Privatdozent und leitet die Abteilung Epidemiologie am Deutschen Institut für Ernährungsforschung in Bergholz-Rehbrücke.

▷ (außer bei Diabetikern) das Risiko für Herzkrankheiten jedoch nicht, da die leicht erhöhten Cholesterinwerte offenbar durch andere ernährungsphysiologisch günstige Effekte ausgeglichen werden.

Nüsse haben zwar einen hohen Fettanteil, weshalb viele Verbraucher sie meiden. Die enthaltenen Fettsäuren sind jedoch zum großen Teil ungesättigt; das gilt auch für Erdnüsse. Walnüsse stellen sogar eine besonders reichhaltige Quelle für Omega-3-Fettsäuren dar. Kontrollierten Ernährungsstudien zufolge wirken sich Nüsse insgesamt günstig auf den HDL/LDL-Quotienten aus. Wie epidemiologische Untersuchungen zeigen, senken sie außerdem das Risiko für Herzkrankheiten und Diabetes. Tatsächlich neigen Menschen, die viel davon essen, weniger zu Fettsucht – möglicherweise weil Nüsse stark sättigen und sich dadurch der Verzehr anderer Nahrungsmittel reduziert.

Bedenklich an der Ernährungspyramide des US-Landwirtschaftsministeriums ist auch, dass sie den optimalen Anteil von Milchprodukten zu hoch ansetzt. Das empfohlene Äquivalent von täglich zwei bis drei Glas Milch wird gewöhnlich mit deren hohem Calciumgehalt begründet, der Osteoporose und Knochenbrüchen vorbeugen soll. Frakturen im Alter kommen jedoch gerade in den Ländern am häufigsten vor, wo Milcherzeugnisse in größerem Umfang konsumiert werden. Prospektive Studien lieferten außerdem keine Hinweise darauf, dass osteoporosebedingte Knochenbrüche bei Gruppen mit erhöhtem Verzehr an Molkereiprodukten seltener auftreten.

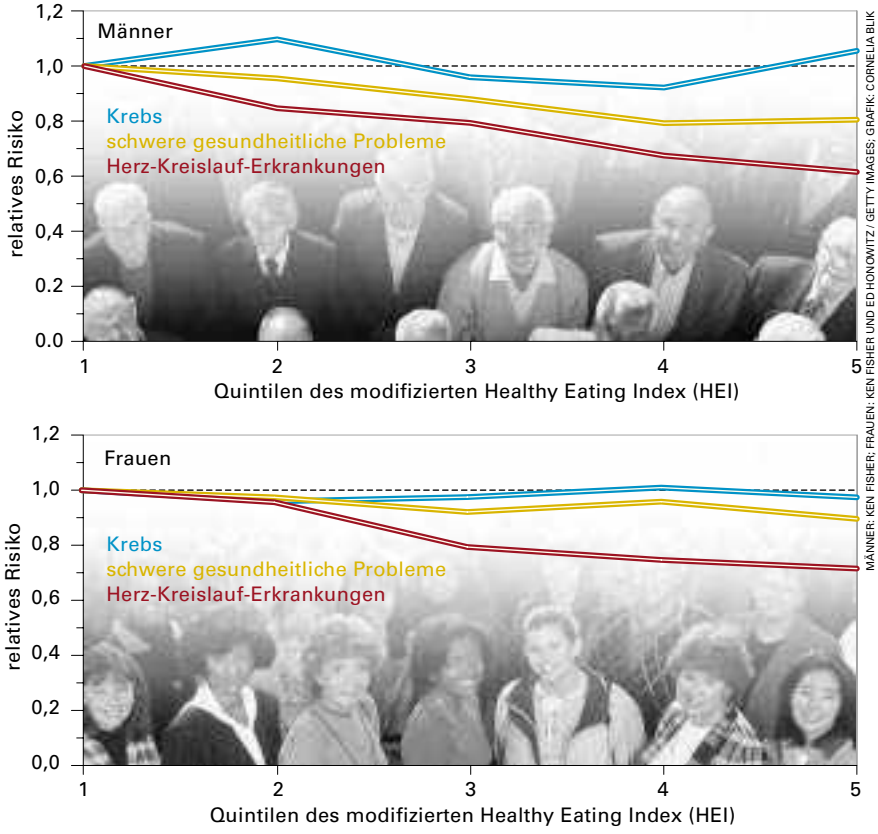
Problematische Milchprodukte

Calcium ist zwar ein essenzieller Nahrungsbestandteil, doch wurde der Bedarf an diesem Mineral zur Erhaltung der Knochenmasse wohl überbewertet. Überdies steht keineswegs fest, dass Milchprodukte in großen Mengen unbedenklich sind: Bei Männern, die viel davon verzehrten, fand sich in mehreren großen Studien ein erhöhtes Risiko für ein Prostatakarzinom; in einigen Untersuchungen zeigte sich bei Frauen eine gesteigerte Rate an Eierstockkrebs. Als Ursache dafür galt zunächst der Fettgehalt. Doch diese Annahme bestätigte sich bei genauerer Analyse nicht. Am deutlichsten war das Risiko für Prostatakrebs mit hoher Calciumzufuhr korreliert.

Die genaue Einschätzung der gesundheitlichen Effekte von Milchprodukten erfordert sicherlich weitere Untersuchungen. Im Augenblick erscheint es aber nicht ratsam, eine Empfehlung zu vermehrtem Konsum auszusprechen. Die meisten Erwachsenen, die sich insgesamt gesund ernähren, nehmen die erforderliche Menge Calcium zu sich, wenn ihr täglicher Verbrauch von Molkereierzeugnissen einem Glas Milch entspricht. Nur unter besonderen Umständen kann der Calciumbedarf erhöht sein – etwa nach den Wechseljahren. Dann lässt er sich jedoch kostengünstiger und ohne unnötige Fett- und Kalorienzufuhr durch Einnahme entsprechender Nahrungsergänzungsmittel decken.

Obwohl die Ernährungspyramide des US-Landwirtschaftsministeriums im letzten Jahrzehnt zum Dogma avancierte, gab es bis vor kurzem keine einzige Studie, in welcher der Gesundheitszustand von Menschen untersucht wurde, die ihren Empfehlungen folgen. Vermutlich haben diese Empfehlungen tatsächlich einige positive Effekte, zum Beispiel durch den Wert, den sie Obst und Gemüse beimessen. Und ein verminderter Gesamtfettanteil in der Nahrung reduziert natürlich auch den Verzehr an schädlichen gesättigten und Trans-Fettsäuren. Doch wer den Empfehlungen folgt, isst wahrscheinlich ebenfalls weniger ungesättigte Fettsäuren und dafür mehr raffinierte Kohlenhydrate, sodass Nutzen und Schaden sich aufheben.

Um den gesundheitlichen Gesamteffekt der Ernährungspyramide zu ermitteln, verwendeten wir den Healthy Eating Index (HEI), der vom US-Landwirtschaftsminis-



MÄNNER: KEN FISHER; FRAUEN: KEN FISHER UND ED HONOWITZ / GETTY IMAGES; GRAFIK: CORNELIA BLIK

Die gesundheitlichen Auswirkungen der modifizierten Ernährungspyramide wurden anhand der Erkrankungsraten unter den 67 271 Frauen der Nurses Health Study und den 38 615 Männern der Health Professional Follow-Up Study ermittelt. Bei Frauen und Männern der fünften Quintile (jenen 20 Prozent der Teilnehmer, deren Speisezettel den Empfehlungen der Pyramide am nächsten kam) waren Herz-Kreislauf-Erkrankungen wesentlich seltener als in der ersten Quintile (jenen 20 Prozent, die den Empfehlungen am wenigsten folgten). Die Häufigkeit von Krebs war dagegen in allen Gruppen gleich.

ZEFA / CHRISTINE FLEURENT

Hülsenfrüchte wurden bisher mit rotem Fleisch in einen Topf geworfen. Sie sind jedoch sehr viel gesünder und verdienen zusammen mit Nüssen einen vorderen Platz auf dem Speisezettel.

terium für nationale Ernährungsprogramme entwickelt wurde. Er gibt an, wie genau sich eine Testperson an die Ernährungsempfehlungen der Pyramide hält.

Anhand der Daten unserer großen epidemiologischen Studien berechneten wir den HEI jedes Teilnehmers und untersuchten dann, ob ein Zusammenhang mit dem Risiko für die folgenden schweren Gesundheitsprobleme bestand: Herzinfarkt, Schlaganfall, Krebs oder Tod durch eine nichttraumatische Ursache. Dieses Risiko war zwar bei jeweils gleich alten Männern und Frauen mit den höchsten HEI-Werten erniedrigt. Allerdings rauchten die betreffenden Personen weniger, bewegten sich mehr und pflegten einen generell gesünderen Lebensstil als andere Gruppen. Nachdem wir eine Korrektur für diese Variablen vorgenommen hatten, zeigte sich, dass die Teilnehmer mit den höchsten HEI-Werten nicht signifikant gesünder waren als die anderen. Wie erwartet, heben sich Nutzen und Schaden der Empfehlungen in der Ernährungspyramide auf.

Ein allgemeiner Ratgeber für gesunde Ernährung bleibt dennoch sinnvoll. Daher haben wir versucht, nach heutigem Wissensstand eine modifizierte Pyramide zu entwickeln. Darin liegt der Schwerpunkt auf dem Vermeiden von Übergewicht durch tägliche Bewegung und eine begrenzte Kalorienzufuhr. Zudem soll der Großteil der Nahrung aus gesunden Fetten (flüssigen Pflanzenölen aus Oliven, Raps, Soja, Maiskeimen, Sonnenblumen und Erdnüssen) und gesunden Kohlenhydraten (Vollkornbrot, ungeschälter Reis, Haferkleie und so weiter) bestehen. Hinzu kommen reichlich Gemüse und Obst. Gesunde proteinhaltige Lebensmittel (Nüsse, Hülsenfrüchte, Fisch, Geflügel und Eier) sind in moderaten Mengen vorgesehen, Milchprodukte dagegen auf ein bis zwei Rationen pro Tag beschränkt. Rotes Fleisch, Butter, raffinierte Getreideprodukte (wie Weißbrot, geschälter Reis und Nudeln aus Weißmehl), Kartoffeln und Zucker sollten kaum gegessen werden.

Neue Ernährungspyramide im Test

Nahrungsmittel, die Trans-Fettsäuren enthalten, kommen in der Pyramide gar nicht vor, da sie mit gesunder Ernährung nicht vereinbar sind. Dagegen erscheint ein Multivitaminpräparat im Allgemeinen sinnvoll. Auch mäßiger Alkoholgenuss ist durchaus positiv zu werten (falls nicht Begleiterkrankungen oder Medikamenteneinnahme dagegensprechen): Mehr und mehr Studien zeigen, dass er günstige Effekte auf das Herz-Kreislauf-System hat. Allerdings gilt: Kein Alkohol ist eindeutig besser als zu viel davon.

Ist unsere modifizierte Pyramide wirklich gesünder als die des US-Landwirtschaftsministeriums? Wir haben einen neuen HEI-Index entwickelt, der angibt, wie genau sich eine Testperson an unsere Empfehlungen hält. Bei Anwendung dieses Maßstabs auf eigene Daten zeigt sich, dass Männer und Frauen, die sich nach den Empfehlungen unserer Pyramide ernähren, tatsächlich seltener schwere Gesundheitsprobleme haben (Grafik auf der linken Seite). Dabei rühren die positiven Effekte fast ausschließlich daher, dass das Risiko kardiovaskulärer Erkrankungen bei Männern um 30 und bei Frauen um 40 Prozent sinkt. Die Gefahr von Krebs nimmt dagegen nicht ab. Allerdings haben Gewichtsreduktion und körperliche Aktivität bei vielen Tumorarten eine geringfügige vorbeugende Wirkung.

Natürlich bleiben gewisse Unsicherheiten über den Zusammenhang von Ernährung und Gesundheit bestehen. So sind die Rolle der Milchprodukte, die gesundheitlichen Effekte bestimmter Obst- und Gemüsesorten, Nutzen und Risiken von Vitaminpräparaten sowie die langfristigen Auswirkungen der Ernährung im Kindes- und frühen Erwachsenenalter noch nicht genau genug untersucht. Auch das Zusammenspiel von Ernährungsweise und genetischer Disposition ist nicht ausreichend geklärt und sollte gründlicher erforscht werden.

Noch ein wichtiger Punkt sei am Ende erwähnt: Um das Vertrauen der Öffentlichkeit nicht zu verlieren und damit jede Möglichkeit einer Einflussnahme zu verspielen, ist unbedingt sicherzustellen, dass offizielle Ernährungsempfehlungen ausschließlich auf wissenschaftlich gesicherten Erkenntnissen beruhen. Das Landwirtschaftsministerium ist da nicht unbedingt die beste Quelle, weil es enge Verbindungen mit der Agrarindustrie unterhält. Ernährungsleitlinien sollten vielmehr aus einem Umfeld kommen, das frei von politischen und ökonomischen Interessen ist. ◁

Walter C. Willett und **Meir J. Stampfer** lehren Medizin an der Harvard Medical School in Boston (Massachusetts). Stampfer leitet zudem die Abteilung für Epidemiologie, Willett die für Ernährungswissenschaften an der Harvard School of Public Health.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Referenzwerte für die Nährstoffzufuhr. Deutsche und Österreichische Gesellschaft sowie Schweizerische Vereinigung für Ernährung (Hg.). Umschau/Braus, Frankfurt 2000.

Eat, Drink, and Be Healthy: The Harvard Medical School Guide to Healthy Eating. Von Walter C. Willett et al. Simon & Schuster, 2001.

The Role of Low-Fat Diets in Body Weight Control: A Meta-Analysis of ad libitum Dietary Intervention Studies. Von A. Astrup et al. in: International Journal of Obesity, Bd. 24, S. 1545 (2001).

Primary Prevention of Coronary Heart Disease in Women through Diet and Lifestyle. Von Meir J. Stampfer et al. in: New England Journal of Medicine, Bd. 343, Nr. 1, S. 16; 6.6.2000.

Weblinks zum Thema sind bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis« zu finden.

Tintenstrahldrucker – die Mikrodampfmaschinen

Von Mark Fischetti

Viele reden von der Mikrosystemtechnik, die Hersteller von Tintenstrahldruckern beherrschen sie schon lange. Denn ihre Produkte sind zumindest teilweise mikromechanische Systeme. Zur Makrowelt gehört der Schrittmotor, der mittels Antriebsriemen den Druckkopf über das zu bedruckende Blatt Papier zieht. Zur Welt der Großen zählt auch das Flachbandkabel, das Steuersignale von der Elektronik an den Druckkopf liefert. Der aber arbeitet in mikroskopischen Dimensionen, um winzige Tintentröpfchen mit hoher Präzision auf das Papier zu bringen.

Piezoelektische Tintenstrahldrucker etwa von Epson besitzen einen Druckkopf, der fester Bestandteil des Geräts ist. Ausgetauscht werden nur die Tintenkartuschen, die als Tank für den Tintenvorrat dienen. Seinen Namen verdankt dieser Typus dem Piezo-Effekt: Spezielle Kristalle im Druckkopf ändern ihre Ausmaße, wenn eine elektrische Spannung angelegt wird. Auf diese Weise erzeugen sie den notwendigen Hochdruck, um die Tintentropfen aus den Düsen herauszuschießen. Die konkurrierende Technik der Thermo-Tintenstrahldrucker – Hersteller sind zum Beispiel Canon und Hewlett-Packard – integriert Einmal-Druckköpfe in die Kartusche (siehe Grafik). Die Tinte wird über einen elektrischen Widerstand in Sekundenbruchteilen hocherhitzt, sodass sich eine mikroskopisch kleine Dampfblase bildet, die wiederum vier billionstel Liter Tinte durch eine Düse auf das Papier schleudert.

Unabhängig vom Typ enthält ein Druckkopf auf der Fläche von etwas mehr als einem Quadratzentimeter je nach Modell zwischen 360 und 1200 Tintendüsen. Jede davon wird über einen eigenen Kanal befüllt und durch einen individuellen Piezo-Kristall oder Thermo-Widerstand mehrere hundertmal pro Sekunde abgefeuert. Die Düsen können Tintentröpfchen mit einer Genauigkeit von zehntausendstel Millimetern zu Papier bringen. Der resultierende Punkt durchmisst gerade mal ein Viertel bis ein Zehntel der Dicke eines menschlichen Haares. Auf Spezialpapier lässt sich eine Auflösung bis 4800 mal 1200 dpi (*dots per inch,* also Punkte pro Zoll) erreichen, das entspricht umgerechnet 1890 mal 472 Punkten pro Zentimeter. Laut Frank L. Cloutier, zuständiger Entwicklungschef von Hewlett-Packard, wäre eine noch höhere Druckauflösung für das menschliche Auge nicht wahrnehmbar.

Die weitere Entwicklung konzentriert sich deshalb im Wesentlichen auf die Tinten. Sie sollen schneller auf dem Papier trocknen, aber dennoch nicht die Düsen verstopfen und zudem farbecht sein. Das Ziel sind lichtbeständige Drucke, die von einem Fotoabzug kaum zu unterscheiden sind. ◁

Mark Fischetti ist Redakteur von Scientific American.

Private PC-Anwender bevorzugen den Tintenstrahldrucker, weil er schon zu Discountpreisen zu haben ist.

WUSSTEN SIE SCHON?

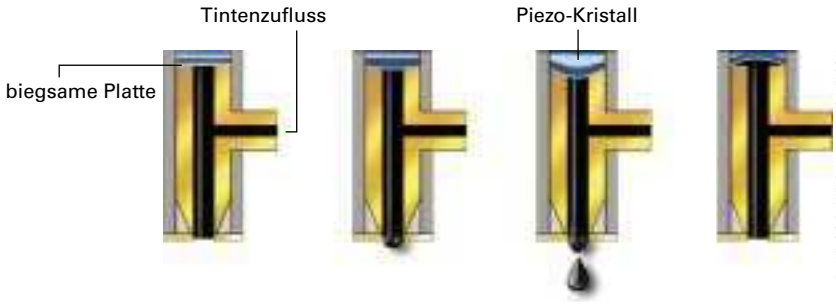
Tintenstrahldrucker arbeiten mit denselben **subtraktiven Grundfarben**, die auch zum farbigen Druck von Zeitungen und Zeitschriften eingesetzt werden: Cyan, Magenta, Gelb und Schwarz. So überrascht es nicht, dass diese Technik mittlerweile im Großformat zum Einsatz kommt. So genannte **Large Format Printer** (rechts) konkurrieren mit klassischem Siebdruck zum Beispiel bei der Produktion von Postern, Plakaten und Präsentationsmaterial. Der Markt wächst nach einer Schätzung von Kodak pro Jahr um fünfzig Prozent.

KODAK

Für Piezo-Drucker können **Billiganbieter** leicht günstigere Kartuschen herstellen. In Thermo-Kartuschen jedoch ist ein patentgeschützter Steuerchip integriert, und sie müssen gebrauchte recyceln. Die Originalhersteller begegnen dem durch den Einbau einer Zählfunktion in den Chip. Denn Tintenstrahldrucker werden heute so preiswert verkauft, dass das Grundgerät die Kosten der Hersteller nicht mehr deckt. Den eigentlichen Gewinn erzielen sie mit Verbrauchsmaterial.

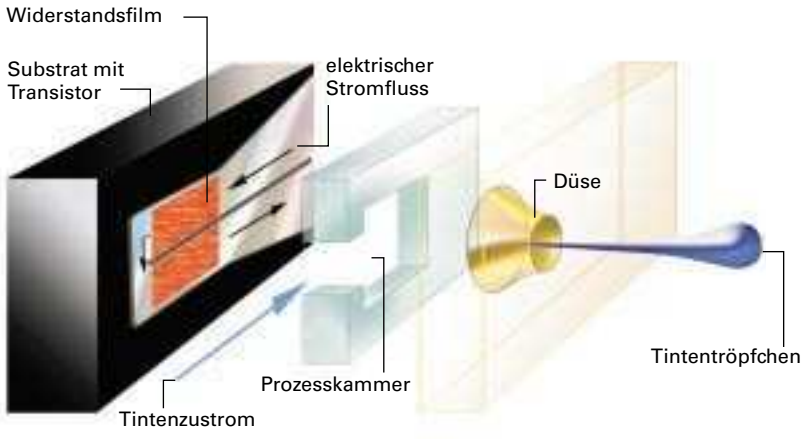
Wenn ein Tintentropfen auf der Oberfläche eines Papiers ohne spezielle **Beschichtung** auftrifft, wird er von dessen Fasern aufgesogen. Der Punkt franst deshalb unregelmäßig aus. Ausgewiesenes Tintenstrahl-Papier trägt deshalb einen speziellen Wachsfilm, der exakt gedruckte Punkte ermöglich. Da sie auch auf kleiner Fläche konzentriert bleiben, erhöht dieses Prinzip letztlich auch die Auflösung. Nur so ist die heute gewünschte »Fotoqualität« möglich.

Der Druckkopf eines Thermo-Tintenstrahldruckers enthält Kartusche und Elektronik im Paket. Letztere erhält Steuerbefehle über ein Kontaktfeld auf der Rückwand der Kartusche. Jede Düse wird über einen eigenen Transistor angesteuert.



DANIELS & DANIELS; NACH: NIELS NIELSON

Ein kurzer Stromstoß regt in einem piezoelektrischen Druckkopf einen Piezo-Kristall zu Schwingungen an. Wenn er sich in Richtung Tintengang biegt, drückt der Kristall gegen eine verformbare Platte, die wiederum ein Tintentröpfchen aus der Düse presst. Schwingt der Kristall zurück, kehrt die Platte in ihre Ausgangsform zurück und saugt Tinte aus der Kartusche nach.



DANIELS & DANIELS; NACH: NIELS NIELSON

In einem Thermo-Druckkopf bewirkt ein kurzer Stromstoß, dass sich eine nur etwa hundert Atome dünne Widerstandsschicht aus Tantalum und Aluminium in Sekundenbruchteilen erhitzt. Für eine Millionstelsekunde erhitzt sich der Widerstand auf 300 Grad Celsius. Tintenmoleküle formen eine winzige Dampfblase, die expandiert und dabei ein Tintentröpfchen aus der Düse des Druckkopfes schleudert. Zu diesem Zeitpunkt hat sich der Widerstandsfilm bereits wieder abgekühlt, woraufhin die Blase in sich zusammenfällt. Das so entstehende Vakuum saugt Tinte aus der Kartusche in den Düsengang nach.

Chaos in der Quantenwelt

Nicht nur Planetensysteme oder tropfende Wasserhähne zeigen »chaotisches« Verhalten: Sie reagieren unabsehbar auf winzige Änderungen der Anfangsbedingungen. Auch in der Quantenwelt tritt Chaos auf – mit wichtigen Konsequenzen für nanotechnische Anwendungen.

Von Mason A. Porter und Richard L. Liboff

Im Laufe des 20. Jahrhunderts entstanden zwei Theorien, die den Forschern die Hoffnung raubten, sie würden eines Tages das Verhalten der Natur vollständig vorhersagen können. Zum einen enthüllte die Quantentheorie eine prinzipielle Unbestimmtheit bei Vorgängen winzigster Größenordnung: Beispielsweise lassen sich Ort und Impuls eines Elektrons nicht gleichzeitig präzise feststellen. Zum anderen analysiert die so genannte Chaostheorie dynamische Systeme, deren Verhalten extrem stark von den Anfangsbedingungen abhängt: Eine unmerkliche Änderung des Anfangswerts einer Variablen kann zu einem völlig unvorhersagbaren Systemverhalten führen. Für diese Art von Chaos gibt es die unterschiedlichsten Beispiele – von der Tropfenfolge eines undichten Wasserhahns bis zu Planetenbahnen.

Angesichts der für Chaos wie für Quanten typischen Unvorhersagbarkeit stellt sich die Frage, was geschieht, wenn beides zusammenkommt – am Ende totales Chaos? Vermutlich nicht; seit kurzem verfügen wir über Methoden, uns dem Quantenchaos – dem chaotischen Verhalten von Quantensystemen – modellhaft zu nähern. Denn seit die Physiker auf Chaos jeder Größenordnung stoßen, können sie die Möglichkeit nicht ausschließen, es auch in den winzigsten Gebilden zu finden, die sie heute zu konstruieren vermögen. In solchen nur einige Nanometer – millionstel Millimeter – großen Geräten macht sich jedenfalls zusätzlich die Unbestimmtheit der Quantenwelt bemerkbar. Erste Versuche, dieses exotische Gebiet zu verstehen, haben mathematisch und physikalisch bedeutsame Resultate erbracht.

Erste Indizien für chaotisches Verhalten tauchten gegen Ende des 19. Jahrhunderts auf, als der französische Mathematiker, Physiker und Philosoph Henri Poincaré mit mathematischen Gleichungen die Positionen mehrerer Planeten beim Umlauf um die Sonne vorhersagen wollte. Auf den ersten Blick eine überschaubare Aufgabe: Man stellt die anfänglichen Orte und Geschwindigkeiten fest, setzt sie in ein Gleichungssystem ein, das auf den Newton'schen Bewegungsgesetzen beruht, und als Resultat kommen die künftigen Planetenpositionen heraus. Doch Poincaré erlebte eine böse Überraschung. Selbst wenn er nur zwei Planeten betrachtete, führten schon winzigste Unterschiede in den Anfangswerten für Ort und Geschwindigkeit zu unabsehbaren Veränderungen der zukünftigen Positionen. Ohne dass Poincaré seinerzeit den heute gängigen Ausdruck gebrauchte, hatte er ein »chaotisches« System entdeckt.

Die ganze Bedeutung von Poincarés Arbeit wurde erst viel später offenbar. In den 1960er Jahren entdeckte der amerika-

MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DER AUSTRALIA'S COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANIZATION

Das pelzige Gebilde in dieser mikroskopischen Aufnahme besteht aus unzähligen Nanoröhren. Jeder einzelne der feinen Fäden ist ein Rohr aus regelmäßig angeordneten Kohlenstoffatomen; es hat nur rund einen Nanometer (millionstel Millimeter) Durchmesser, kann aber bis zu einigen Millimetern lang werden. In Nanoröhren – und anderen nanotechnischen Artefakten – sind komplizierte Kombinationen von chaotischen und quantenphysikalischen Phänomenen möglich. Dieses Quantenchaos lässt sich gegenwärtig nur mit stark vereinfachten Modellrechnungen erforschen.

nische Meteorologe Edward Lorenz chaotisches Verhalten in einem einfachen Gleichungssystem, das er zur Untersuchung atmosphärischer Vorgänge aufgestellt hatte. Bald schienen den Forschern überall Beispiele für Chaos zu begegnen – in den Spiralarmen von Galaxien und in praktisch jeder Art Oszillator, von elastischen Federn bis zu elektrischen Stromkreisen.

Nachdem die Wissenschaftler überall chaotisches Verhalten gefunden hatten, lag die Frage nahe: Zeigen auch Vorgänge in Atomen und Molekülen manchmal chaotische Eigenschaften – und wenn ja, wie können wir solche Phänomene der Quantenwelt untersuchen? Als Antwort schrumpfen wir mit Hilfe mathematischer Simulationen das Konzept des makroskopischen Chaos, bis es in die Quantenbezirke von Atomen und Elektronen passt. Wie sich zeigt, taucht dort manchmal gar kein Chaos auf, doch in anderen Fällen wimmelt es nur so davon; und gelegentlich herrscht unter bestimmten Bedingungen größeres Chaos als unter anderen. Aus diesen Arbeiten gehen neue mathematisch-physikalische Theorien hervor, die auf zahlreiche exotische Apparate angewandt werden können – auf Quantenpunkte, Nanoröhrchen und supraleitende Quanteninterferenz-Detektoren.

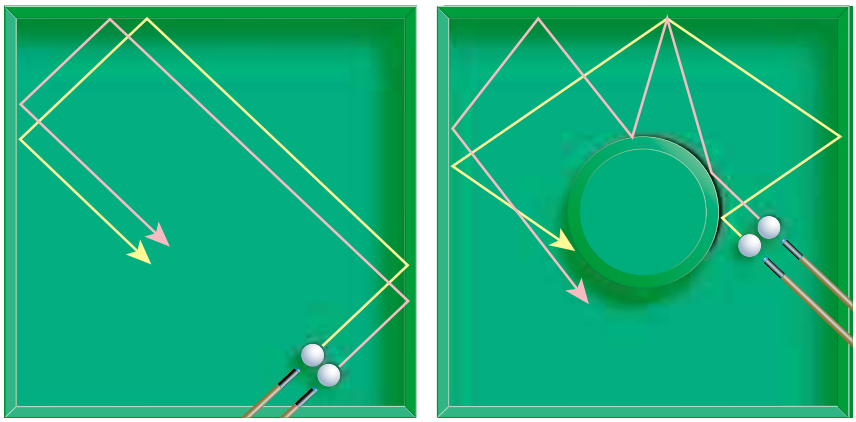
Das Verhalten chaotischer Systeme ist oft nur schwer zu durchschauen. Darum beginnen wir mit einem sehr einfachen Beispiel, einem Teilchen in einer Schachtel. Eine zweidimensionale Version dieses Systems entspricht einer Kugel auf einem Billardtisch, wobei der Einfachheit halber die Reibung vernachlässigt wird. Schon dieses simple Modell wird uns einen Weg in die Welt des Quantenchaos weisen.

Billard mit Kreisbande

Auf dem idealen rechteckigen Billardtisch stoßen wir eine Kugel gegen die nächstliegende Bande. Die Kugel trifft die Bande, prallt unter einem Reflexionswinkel ab, der gleich dem Einfallswinkel ist, rollt über den Tisch, bis sie eine andere Bande trifft, und prallt dort wiederum gemäß dem Reflexionsgesetz ab. Wenn weder Reibung noch andere Kräfte die Kugel bremsen, rollt sie für immer auf dem Tisch umher.

Um die Kugelbahn unter geringfügig veränderten Anfangsbedingungen zu beobachten, unterbricht der Experimentator den simulierten Stoß und legt die Kugel fast – aber nicht ganz – exakt auf den Ausgangspunkt zurück. Wird sie genau wie vorher angestoßen – unter demselben Winkel und mit derselben Kraft –, so folgt sie zunächst fast derselben Trajektorie wie zuvor. Doch allmählich unterscheiden sich die Bahnen mehr und mehr. Bei dieser so genannten linearen Divergenz nimmt der Abstand der Bahnen proportional zur verstrichenen Zeit zu. Auf diesem Tisch verhält sich kein Billardstoß chaotisch.

Nun kleben wir zusätzlich in die Mitte des Tisches eine dicke Kreisscheibe, legen die Kugel in deren Nähe und stoßen zu. Die Kugel prallt von der kreisförmigen Bande ab, trifft eine Außenbande, rollt zu einer anderen Außenbande, trifft wieder die Kreisbande und so weiter. Wie zuvor stoppen wir die Kugel, legen sie fast – aber nicht genau – auf ihren Ausgangspunkt zurück und versetzen ihr denselben Stoß. Diesmal wird die Kugel bald einer völlig anderen Bahn folgen als beim ersten Mal. Wir beobachten exponentielle Divergenz: Mit der Zeit wächst der Abstand der beiden Trajektorien ▷



ALLE GRAFIKEN: AMERICAN SCIENTIST

Eine einzelne Kugel auf einem rechteckigen Billardtisch zeigt kein chaotisches Verhalten: Leicht veränderte Startpositionen führen zu kaum veränderten Trajektorien (links). Doch schon ein kreisförmiges Hindernis in der Tischmitte sorgt für Chaos: Geringfügig verschobene Ausgangspositionen ergeben völlig unterschiedliche Bahnen (rechts).

▷ exponentiell. Ein solches Billardspiel nannte der Mathematiker Yakov Sinai von der Princeton University chaotisch.

Der Tisch mit der kreisförmigen Bande in der Mitte illustriert eine grundlegende Eigenschaft des Chaos: die empfindliche Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen. Selbst infinitesimal verschobene Startpunkte der Kugel ergeben völlig unterschiedliche Resultate. Dieses Phänomen entspricht dem, das Poincaré entdeckte, als er die Gleichungen für Planetenbewegungen analysierte. Auch bei anderen Billardtypen entsteht chaotisches Verhalten – zum Beispiel, wenn die Bande wie die Laufstrecke in einem Stadion geformt ist.

Newtons Pendel als Vorbild

Wenn die Kugel nur ein paar Mal von den Banden abprallt, vermag ein Beobachter ohne weiteres ihrer Bahn zu folgen. Um eine Trajektorie aufzuzeichnen, legt man einfach ein zweidimensionales Netz über den Billardtisch und trägt darauf in regelmäßigen Zeitintervallen die momentanen Orte als Punkte ein. Doch nach zahlreichen Bandenkollisionen wird die Kugel ihre frühere Bahn mehrfach kreuzen oder manchmal sogar zurücklaufen, und mit der Zeit ergeben die notierten Punkte ein unübersichtliches Durcheinander. Darum bevorzugen Mathematiker und Physiker eine andere Darstellung, die bis auf Isaac Newton zurückgeht.

Im 17. Jahrhundert wählten die Physiker oft ein Pendel, um die Naturkräfte zu studieren. Wie Newton herausfand, konnte er den Zustand eines Pendels mit zwei Variablen vollständig beschreiben: Ort und Impuls. Auch heute verwenden Mathematiker und Physiker diese Variablen zur Beschreibung subatomarer Teilchen. Der Zustand eines Teilchens lässt sich – genau wie ein Newton'sches Pendel – durch seinen Ort im Raum und seinen Impuls charakterisieren. Die Forscher tragen nun diese Variablen gegeneinander auf – etwa Impuls gegen Ort – und erzeugen auf diese Weise den so genannten Phasenraum.

Leider sind Phasenräume abstrakt und – außer für geübte Mathematiker – eher unanschaulich. Selbst wenn ein Forscher nur ein einziges Teilchen im realen dreidimensionalen Raum untersuchen will, hat der zugehörige Phasenraum schon sechs Dimensionen – je drei für Ort und Impuls. Jeder von uns kann ein Diagramm in zwei Dimensionen zeichnen, und sogar drei lassen sich recht einfach darstellen und verstehen; aber wie stellt man sich eine Kurve in vier oder mehr Dimensionen vor?

Da hilft auch Vereinfachung nicht viel. Zum Beispiel beschränkt sich das Billardbeispiel auf eine einzelne Kugel, die nur zweidimensionale Bewegungen ausführt. Das sorgt für einen Phasenraum von »nur« vier Dimensionen. Dennoch ist es nicht einfach, ein vierdimensionales Phänomen auf ein Blatt Papier zu zeichnen. Zum Glück vermag ein Computer ohne weiteres mit vier – oder noch viel mehr – Dimensionen umzugehen. Ein Forscher kann, um die Bewegung eines Systems aus mehreren Teilchen zu untersuchen, deren Anfangsdaten für Ort und Impuls eintippen; der Computer setzt nun diese Daten in Gleichungen ein, die den Mehrteilchenzustand als einen Punkt darstellen, der durch einen Raum mit zahlreichen Dimensionen wandert. Die Software kann dann »Schnitte« durch diese vieldimensionale Trajektorie im Phasenraum anfertigen. Solche Poincaré-Schnitte lassen sich ihrerseits auf eine zweidimensionale Fläche projizieren; so entsteht eine Punktmenge, die man auf einem Bildschirm oder als Papierausdruck betrachten kann. Das Punktmuster stellt eine Folge von Momentaufnahmen des untersuchten Systems dar; daraus kann der Forscher ein gewisses Verständnis für den Zusammenhang zwischen Bedingungen und Ergebnissen entwickeln – etwa indem er jedes Mal, wenn eine bestimmte Bedingung eintritt, gleichsam einen mathematischen Schnappschuss aufnimmt, um eine erwünschte Eigenschaft des Systems zu erforschen.

Ein in einer Hohlkugel gefangenes Teilchen dient als einfaches Modell zur Erforschung chaotischer Phänomene (oben). Um Quantenchaos zu simulieren, beschreibt man das Teilchen mit der quantenphysikalischen Schrödinger-Gleichung und verleiht ihm dadurch Welleneigenschaften (unten).

Sofern eine Poincaré-Abbildung aus einer kontinuierlichen Kurve besteht, wie verwickelt sie auch sein mag, ist das System nicht chaotisch. Erst wenn stattdessen eine zufällig verstreute Folge von Punkten entsteht, gibt sich das System als chaotisch zu erkennen. Wenn wir ein System – beispielsweise eines der oben beschriebenen Billardmodelle – mittels mathematischer Gleichungen beschreiben, Daten zu Ort und Impuls im Laufe der Zeit sammeln und daraus eine Poincaré-Abbildung erzeugen, können wir anhand der Resultate meist zuverlässig chaotisches von nichtchaotischem Verhalten unterscheiden.

Mit diesem Werkzeug wollen wir nun versuchen, zum Quantenchaos vorzudringen. Zunächst wenden wir uns einer etwas komplizierteren Version des Teilchens in

einer Schachtel zu. Stellen wir uns einen dreidimensionalen »Billardtisch« in Form einer Hohlkugel vor und nehmen an, statt einer klassischen Billardkugel sei darin ein Elektron eingeschlossen. Dieses System ist ein Beispiel für Quantenbillard. Wir können es rechnerisch simulieren, um die Bewegung des Elektrons zu untersuchen, während es wiederholt gegen die Wand seines kugelförmigen Gefängnisses prallt.

Da es sich um ein Quantensystem handelt, beschreiben wir das Teilchen mit der so genannten Schrödinger-Gleichung, aus der die bizarren Eigenschaften der Quantenmechanik folgen – zum Beispiel das Heisenberg'sche Unbestimmtheitsprinzip. Es besagt, dass man nicht gleichzeitig Ort und Impuls eines Teilchens zu bestimmen vermag: Je genauer man den Ort eines Teilchens kennt, desto weniger genau kann man den Impuls messen.

Außerdem gilt der so genannte Welle-Teilchen-Dualismus: Quantenobjekte haben sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften. Darum heißt eine Lösung der Schrödinger-Gleichung Wellenfunktion, auch wenn sie ein Teilchen beschreibt. Somit können wir uns das innerhalb der Kugel umherschwirrende Teilchen als Welle vorstellen, die im kugelförmigen Hohlraum hin und her reflektiert wird. Wir brauchen keine zusätzliche Gleichung, um die Hohlkugel darzustellen, sondern definieren die Schrödinger-Gleichung so, dass die Welle dort, wo sie die Kugelfläche erreicht, verschwindet. Wir können also das gesamte System – Teilchen oder Welle in einer Hohlkugel – mit nur einer Schrödinger-Gleichung beschreiben.

Mit dem Wellenbild lassen sich die Vorgänge in dieser Kugel gut veranschaulichen. Viele gewöhnliche Wellen – Meereswellen oder Schwingungen einer Gitarrensaite – bestehen aus einer Überlagerung von Teilwellen unterschiedlicher Frequenz. Eine Welle kann auch aus nur einer einzigen Frequenz bestehen; eine solche einfache Welle nennen wir eine Normalmode. Wir können eine Einzelwelle passender Frequenz auswählen und in die Schrödinger-Gleichung einsetzen; die Resultate zeigen, wie diese Welle innerhalb der Kugel hin und her reflektiert wird. Dann können wir untersuchen, was bei Anwesenheit mehrerer Normalmoden geschieht.

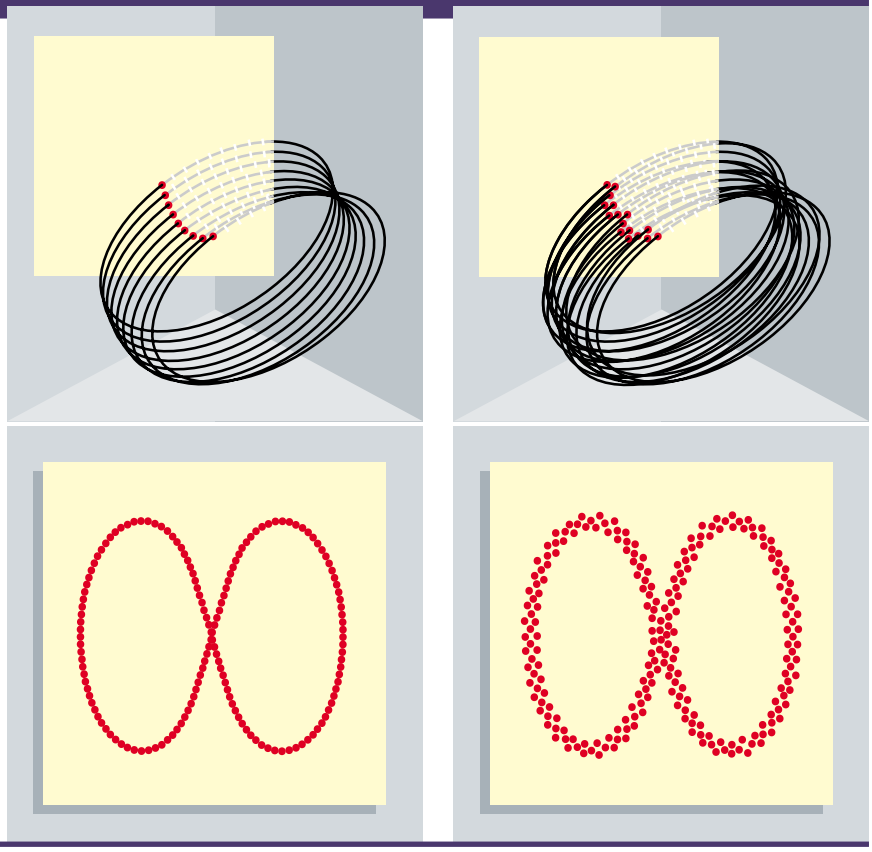
In den obigen Beispielen suchten wir nach Chaos, indem wir die Ausgangsposition einer Billardkugel leicht variierten und dann ihre Bahn verfolgten. Jetzt verändern wir nicht die Startposition, sondern fügen eine zweite Normalmode hinzu, deren Frequenz sich von der ersten unterscheidet. Um die komplette Lösung der Schrödinger-Gleichung zu erhalten, müssten wir eine unendliche Folge von Normalmoden ansetzen, jede mit eigener Energie und geometrischer Form. Damit die Simulation möglichst einfach bleibt, benutzen wir aber in unserer Wellenfunktion nur zwei Moden.

Quantenbillard in der Hohlkugel

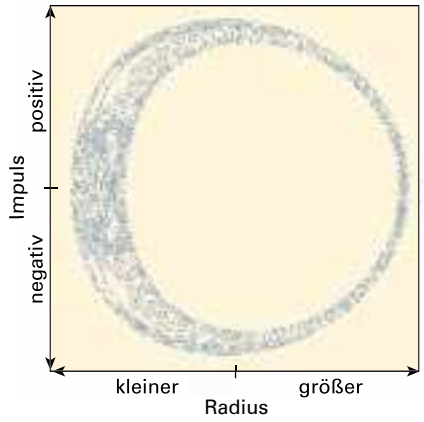
Daraus ergibt sich allerdings eine Gleichung, bei der niemals Chaos entstehen kann. Das heißt, ein Teilchen, das sich innerhalb einer stationären Kugel bewegt, entwickelt niemals chaotisches Verhalten. Wenn wir dieses System mit den oben erwähnten Billardtischen vergleichen, so entspricht das regelmäßige Verhalten der Wellenfunktionen einer linearen Divergenz, wie sie bei einem klassischen Billard zwischen eng benachbarten Trajektorien zu beobachten ist. Wir haben also auf diese Weise noch kein quantenchaotisches System modelliert.

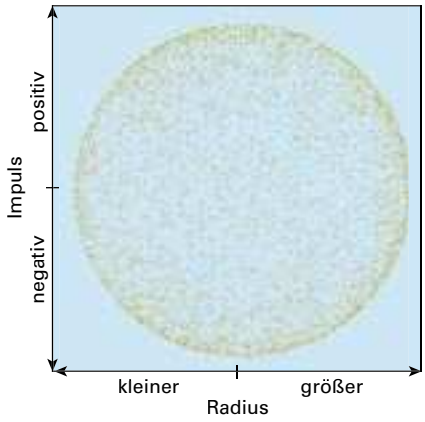
Darum erweitern wir das bisherige Quantenbillard ein wenig: Die Grenze der Hohlkugel soll radial nach innen und außen vibrieren. Wenn nun ein Teilchen die pulsierende Kugelwand trifft, hängt sein ▷

Wie sich Chaos verrät



Im mehrdimensionalen Phasenraum, der durch die Orts- und Impulskoordinaten des betrachteten Systems aufgespannt wird, durchläuft der Systemzustand im Laufe der Zeit eine komplizierte Kurve (oben in drei Dimensionen veranschaulicht). Um diese Kurve zu analysieren, reduziert man die Dimensionen durch einen so genannten Poincaré-Schnitt (das gelbe Quadrat) und erhält ein anschauliches zweidimensionales Bild der Zustandsentwicklung (unten). Falls die Punkte der Poincaré-Abbildung eine kontinuierliche Kurve ergeben, verhält sich das System nicht chaotisch (links oben und unten). Eine verschmierte Punktmenge zeigt hingegen Chaos an (rechts).





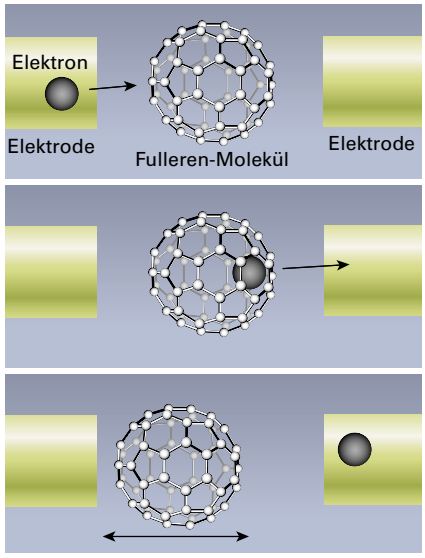
Wird ein Quantenteilchen in eine Hohlkugel gesperrt, die nach den Regeln der klassischen Mechanik vibriert, entsteht so genanntes Semi-Quantenchaos. Der linke Poincaré-Schnitt zeigt, dass Radius und Impuls der vibrierenden Kugel keiner kontinuierlichen Kurve folgen, sondern einen verschmierten Ring bilden: Die Hohlkugel verhält sich chaotisch. Das gilt erst recht für das eingesperrte Quantenteilchen, wie ein entsprechender Poincaré-Schnitt zeigt (rechts).

▷ Schicksal nicht nur vom eigenen Zustand, sondern auch von dem der Wand ab. Dieses Modell ist etwas umständlicher, aber die Komplikation ist nötig, damit Quantenchaos simuliert werden kann.

Die Simulation beginnt – genau wie bei dem Teilchen in einer ruhenden Hohlkugel – mit der Schrödinger-Gleichung für das Teilchen. Doch jetzt brauchen wir auch eine Gleichung für die vibrierende Grenze. Die Wand führt eine klassisch-mechanische Bewegung aus, und dies wird durch eine nicht-quantenmechanische Gleichung dargestellt. Somit geraten wir durch das Beispiel des Teilchens in einer vibrierenden Kugel in den Grenzbereich zwischen Quantenwelt und klassischer Mechanik. Zum Glück lässt sich das dynamische Verhalten des Systems durch die so genannte Hamilton-Funktion formulieren; sie kombiniert die Schrödinger-Gleichung für das Teilchen mit der mechanischen Gleichung für die Wand. Die Hamilton-Funktion drückt die Erhaltung der Gesamtenergie des Systems aus und liefert die gewöhnlichen Differenzialgleichungen, die für die Simulation nötig sind.

Wie zuvor überprüften wir dieses Modell, indem wir zwei Normalmoden einsetzten. Dann führten wir Computersimulationen der von der Hamilton-Funktion abgeleiteten Differenzialgleichungen durch, um das Verhalten des Billard-Systems zu untersuchen. Nach jedem Durchlauf veränderten wir die Startbedingungen ein wenig; zum Beispiel verwendeten wir einen anderen Anfangswert für den zeitlich veränderlichen Kugelradius. Aus solchen Modellrechnungen, die das Verhalten sowohl der Kugelwand als auch des eingeschlossenen Teilchens beschreiben, gewannen wir Poincaré-Abbildungen für jede dieser beiden Komponenten des Systems.

Die mathematischen Simulationen enthüllten Chaos unterschiedlicher Form. Beispielsweise bestanden manche Poincaré-Abbildungen der klassischen Variablen – Radius und Impuls der Wand – aus einem verschmierten Ring von Punkten; das Fehlen einer kontinuierlichen Kurve zeigte somit chaotische Phänomene an. Andere Poincaré-Abbildungen ließen eine geordnetere Form von Chaos in den klassischen Variablen erkennen. Das heißt, manche Abbildungen enthielten besser strukturierte Gebiete – Kurven, die zwar nicht ganz kontinuierlich waren, aber weniger verschmiert aussahen als andere. Auch die Quantenvariablen, die das Teilchen beschreiben, erzeugten in den Poincaré-Abbildungen chaotische Spuren.



Transistoren aus einem einzigen Fulleren-Molekül zwischen zwei Goldelektroden zeigen vermutlich Semi-Quantenchaos. Wenn ein einzelnes Elektron von der linken Elektrode zum Fulleren springt (oben) und danach weiter zur rechten Elektrode (Mitte), beginnt das Fulleren hin und her zu schwingen (unten). Dieses System verhält sich ähnlich wie eine vibrierende Kugel mit darin gefangenem Quantenteilchen.

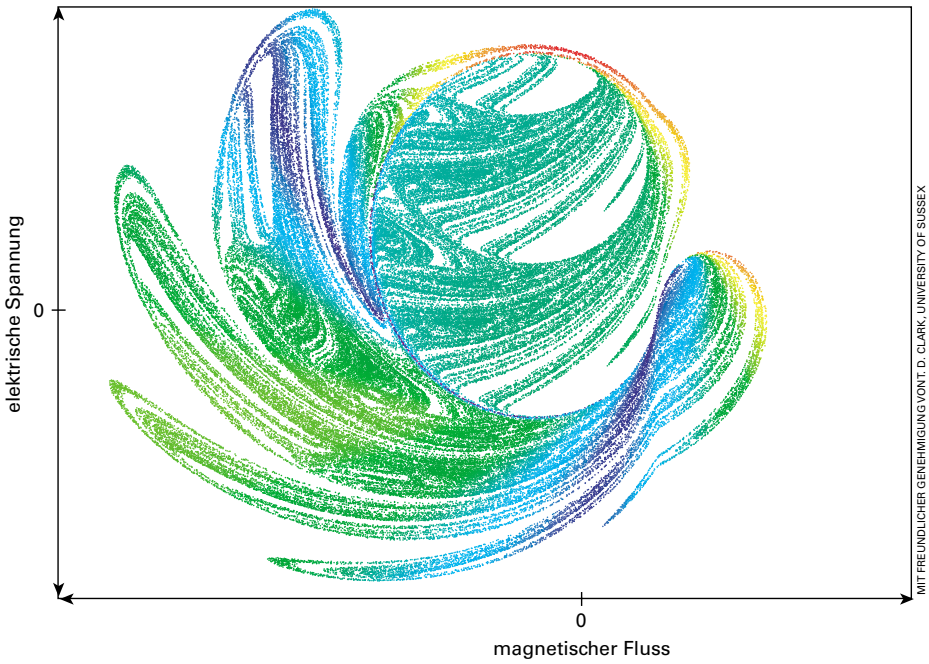
Dieses System zeigt somit ein Verhalten, das man Semi-Quantenchaos nennen könnte: Sowohl die klassischen als auch die quantenmechanischen Komponenten haben chaotische Eigenschaften. Die klassisch-chaotische Bewegung des Kugelrandes erzeugt bei den Normalmoden in der radial vibrierenden Hohlkugel so genanntes Wellenchaos. Es entsteht, weil die Form der Wellen vom Kugelradius abhängt. Schwingt der Radius chaotisch, werden auch die zugehörigen Wellen chaotisch.

Im Prinzip lässt sich das vibrierende Billardmodell in ein rein quantenmechanisches System umwandeln. Dafür muss die Billardgrenze quantenmechanisch statt klassisch formuliert werden. Auf diese Weise entsteht zwar ein vollständig quantisiertes System, aber bislang weiß niemand, ob es in der Natur ein reines Quantensystem gibt, das empfindlich von den Anfangsbedingungen abhängt. Die meisten Wissenschaftler finden die wenigen Beispiele für echtes Quantenchaos, die bisher vorgeschlagen wurden, nicht überzeugend.

Unsere Simulationen liefern nicht nur Mathematikern und theoretischen Physikern interessante Modelle für komplexe Vorgänge in atomaren Größenordnungen. Sie helfen auch zu verstehen, wie nanotechnische Systeme funktionieren und wie wir sie besser kontrollieren können.

Auf der Suche nach mikroskopischem Chaos

Das gilt insbesondere für so genannte Quantenpunkte. Diese nanometergroßen Gebilde bestehen aus einem Halbleiter – Indiumarsenid, Galliumarsenid oder Silizium – oder einem Metall. Ein Quantenpunkt muss so klein sein, dass er nur ein paar Elektronen enthält. Darum entspricht er dem Modell mit einem oder wenigen Teilchen in einer Schachtel. Zwar ist ein vibrierendes Billard vielleicht ein nützliches



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON T. D. CLARK, UNIVERSITY OF SUSSEX

Auch supraleitende Quanteninterferenzdetektoren (Squids) zeigen Semi-Quantenchaos. Indem Forscher an der Universität Sussex einen supraleitenden Ring mit einem Wechselstrom-Resonator koppelten, konnten sie chaotisches Verhalten erzeugen. Der Poincaré-Schnitt zeigt den chaotischen Zusammenhang zwischen der Spannung des klassischen Resonators und dem magnetischen Fluss durch den supraleitenden Ring.

Modell für Quantenpunkte, doch in der Regel werden Quantenbillards mit ruhenden Grenzen verwendet. Wenn deren Form unregelmäßig ist – wie beim klassischen stadionförmigen Billard oder bei Yakov Sinais rechteckigem Billard mit Kreisscheibe –, entsteht eine spezielle Form von Systemverhalten, die quantisiertes Chaos genannt wird. Es entspricht einem klassischen Chaos, das gewisse Quanteneigenschaften aufweist.

Außerdem können mittels Quantenchaos-Modellen extrem winzige, auf ungewöhnliche Weise hergestellte Transistoren optimiert werden. Zum Beispiel hat Hongkun Park mit seinem Team am Lawrence Livermore Laboratory kürzlich einen Transistor fabriziert, indem er ein einzelnes Fulleren-Molekül – ein nanometergroßes fußballförmiges Kügelchen aus 60 Kohlenstoffatomen – mit Goldelektroden verband.

Parks Team untersuchte die Vibrationen dieser Nanotransistoren, durch die immer nur ein einzelnes Elektron zu fließen vermag. Stellen wir uns zunächst ein Fulleren vor, das zwischen zwei Elektroden ruht. Wenn ein Elektron von links auf das Fulleren auf- und gleich wieder rechts abspringt, wackelt das Molekül hin und her. Der Einfachheit halber nehmen wir an, das Fulleren sei eine Kugel; dann ähnelt es dem System, das wir oben diskutiert haben. Allerdings wackelt die Kugel jetzt, statt wie früher zu pulsieren. Dieser Unterschied macht sich in einer veränderten Gestalt der Hamilton-Funktion bemerkbar, aber sie enthält wieder sowohl klassische als auch quantenmechanische Komponenten. Berücksichtigt man die tatsächliche Geometrie des Fullerens, wird das Modell komplizierter.

Quantenchaos-Modelle lassen sich auch auf Nanoröhrchen anwenden. Diese Gebilde sind wie Fullerene aus regelmäßig angeordneten Kohlenstoffatomen aufgebaut, die aber nun anstelle einer Kugel eine Röhre von rund einem Nanometer Durchmesser bilden. Solche Strukturen werden mehrere Mikrometer lang, manchmal sogar bis zu Millimetern. Nanoröhren können sowohl in der Länge als auch im Durchmesser vibrieren, ähnlich wie die pulsierende Kugel in unseren Simulationen. Außerdem können sie wie eine gezupfte Gitarrensaite schwingen: Die ganze Röhre oszilliert hin und her, ohne ihre lokale Form zu ändern.

Unsere Art von Modellen erfasst zwar keineswegs alle Eigenschaften von Nanoröhren; aber immerhin wissen wir, dass ein Elektron, das in einer zylindrischen Röhre mit halbkugelförmig verschlossenen Enden gefangen ist, sich chaotisch verhält. Außerdem erwarten wir, dass Quantenbillard-Modelle auch mit Erfolg auf gekrümmte »Nanohörnchen« aus Kohlenstoff anwendbar sein werden.

Eine völlig andere Klasse von Quantensystemen, deren Verhalten durch Semi-Quantenchaos beschrieben werden kann, sind so genannte supraleitende Quanteninterferenzdetektoren, kurz Squids. Sie erlauben genaueste Messungen von Magnetfeldern. Solche Geräte brauchen wenig Platz, normalerweise nicht mehr als einen Millimeter, doch dieser Millimeter hat es in sich. Für einen Squid braucht man zunächst einen Supraleiter – ein Material, das bei genügend tiefer Temperatur keinen elektrischen Widerstand besitzt und darum Strom ohne Energieverlust transportiert.

Der Squid selbst besteht aus einem kreisförmigen oder quadratischen Supraleiter, den ein elektrischer Oszillator mit Energie versorgt. Der Oszillator erzeugt im Squid Strom und Spannung. Wird der Squid nun einem Magnetfeld ausgesetzt, so ändert sich die Spannung, und das Ausmaß der Spannungsänderung ist ein Maß für die magnetische Feldstärke. Als Joseph Diggins von der University of Sussex in Brighton (England) die quantenmechanische Bewegung der Elektronen im supraleitenden Ring simulierte, entdeckte er auch hier chaotische Phänomene.

Vermutlich werden die Forscher auf ihrer Suche in der Mikrowelt noch auf weitere Formen des Chaos stoßen. Das muss keineswegs immer störende Unordnung bedeuten, sondern kann oft ein besseres Verständnis der Vorgänge im Nanometerbereich ermöglichen – und somit auch bessere Geräte. Wie sich zeigt, können Theoretiker und Praktiker vom Chaos in der Quantenwelt eine ganze Menge lernen. ◁

Mason A. Porter (links) ist Doktorand am Center for Applied Mathematics der Cornell University in Ithaca (US-Bundesstaat New York). **Richard L. Liboff** ist dort seit mehr als dreißig Jahren Professor für Elektrotechnik, Angewandte Physik und Angewandte Mathematik.

© American Scientist Magazine (siehe www.americanscientist.org)

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Quantum Chaos for the Radially Vibrating Spherical Billiard. Von R. L. Liboff und M. A. Porter in: Chaos, Bd. 10, S. 366 (2000).

Quantenchaos. Von Martin C. Gutzwiller in: Spektrum der Wissenschaft 3/1992, S. 56.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

RETRUPOR VERPACKUNGS- UND DÄMMSTOFFWERK GMBH

Stroh statt Plastik

Was hat der kleine Snack für zwischendurch mit einem Pkw-Motor gemein? Richtig, beide müssen vor dem Gebrauch von einer Verpackung befreit werden, und die besteht im Allgemeinen aus Kunststoff. Alleine in Deutschland kommen alljährlich mehr als drei Millionen Tonnen Kunststoff-Verpackungen für Haushalte, Gewerbe und Industrie auf den Markt.

Das auf Erdöl basierende Produkt lässt sich nur mit hohem Geldaufwand stofflich wieder verwerten, vielmehr wird es meist thermisch entsorgt. Die Probleme liegen auf der Hand: Während ein durchaus knapper Rohstoff verbraucht wird, setzt die Verbrennung klimawirksames Kohlendioxid frei. Das in der Nähe von Magdeburg ansässige Unternehmen Retrupor entwickelte deshalb ein Verpackungsmaterial ganz auf Basis nachwachsender Rohstoffe: Verwendet werden Stroh, Altpapier und andere biologisch abbaubare Zutaten.

Der Maschinenbauingenieur Klaus Lederer, einer der beiden Firmengründer, war bis vor einigen Jahren bei einem Unternehmen der Holzbranche beschäftigt und entwickelte dort Anlagen zur Fertigung von Holzteilen. Vor etwa drei Jahren machte er sich selbständig und suchte nach Möglichkeiten, Industrieverpackungen auf Basis von Holzspänen zu entwickeln, doch die Ergebnisse befriedigten nicht: Das Material erwies sich als zu inhomogen, die Formteile gerieten zu unterschiedlich in ihrer Qualität.

Mehr Erfolg brachte Stroh, das auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen der Magdeburger Börde reichlich anfällt. Vor allem in Kombination mit Zellulose aus Altpapier gelang dem Ingenieur ein Verbundwerkstoff, der Wellpappe, Holz und geschäumten Kunststoffen vom Typ Styropor den Markt streitig machen soll. Aus diesem »Retrupor« fertigt das Unternehmen seit Anfang 2002 stoßsichere und stabile Verpackungsformteile hauptsächlich für den Maschinenbau. Darin können zum Beispiel bis zu 150 Kilogramm schwere Motoren oder Pkw-Zylinder passgenau verstaut und transportiert werden.

Neue Chance für Altpapier

Die Retrupor-Masse besteht aus achtzig Prozent Stroh, knapp zwanzig Prozent Zellulose und rund 0,1 Prozent Ingredienzien wie Stärke, Wachs und Naturlatex. Zunächst wird Stroh, das von Weizen, Gerste oder Roggen stammen kann, in drei Stufen auf eine Korngröße von 0,5 bis 1 Millimeter vermahlen und in Silos gelagert. Es verleiht dem späteren Verbundwerkstoff Retrupor die Lockerheit und Elastizität, die er als Verpackungsmaterial benötigt; zudem liefert das Stroh den Hauptanteil am gesamten Volumen.

Retrupor statt Styropor: Feinmechanische Bauteile wie ein Druckmesser, aber auch Maschinenteile bis zu 150 Kilogramm lassen sich mit einem Material aus organischen Abfallprodukten stoßsicher verpacken.

Parallel dazu wird in einem Mischbehälter Wasser und Zellulose aus Altpapier vermengt. Die Zellulose sorgt für die spätere Festigkeit der Verpackung. Ein so genannter Dissolver, eine Art überdimensionaler Quirl, schlägt die Mischung zu einer wässrigen Suspension auf. Dann kommen Wachs, Stärke, ein Fungizid gegen späteren Schimmelbefall und schließlich das fasrige Strohmehl hinzu. Der Brei wird zu einer homogenen Masse verrührt und in Formwerkzeuge gefüllt. Während des Pressvorgangs wird das Material nicht nur in die Form gedrückt, sondern unter hydraulischem Druck bei zwanzig Bar entwässert. Zudem erzeugen die Werkzeuge durch Ansaugen der Masse ein Vakuum, das die Entwässerung unterstützt. »Das Ganze ist

BEIDE ABBILDUNGEN: RETRUPOR

Eine rechnergesteuerte Presse produziert die Verpackungsformteile auf Basis von Stroh und Zellulose. Zur Entwässerung werden die Werkstücke im Wechsel Über- beziehungsweise Unterdruck ausgesetzt.

DAS UNTERNEHMEN IM PROFIL

Die Retrupor Verpackungs- und Dämmstoffwerk GmbH mit Sitz in Glindenberg nahe Magdeburg (Sachsen-Anhalt) wurde 1999 von Klaus Lederer und Jörg Herzberg gegründet. Derzeit beschäftigt das Unternehmen zwölf Mitarbeiter. Mit einem Kostenaufwand von etwa zwei Millionen Euro wurden ein **biologisch abbaubares Verpackungsmaterial** aus nachwachsenden Rohstoffen und die für die Produktion notwendigen Werkzeuge entwickelt. Noch finanziert sich das Unternehmen überwiegend aus Krediten und Zuschüssen der öffentlichen Hand, ab Mitte 2003 soll es schwarze Zahlen schreiben.

ein elektronisch gesteuertes Wechselspiel von Über- und Unterdruck«, erklärt Klaus Lederer.

Die Zutaten für Retrupor, so meint Vertriebsleiter Gerhard Kleve, seien überall erhältlich. Das Firmen-Know-how stecke vor allem in der Vakuum-Fertigungstechnik und in der Herstellung der Werkzeuge, mit denen die Verpackungsteile geformt würden. Bei deren Entwicklung kooperierten die beiden Unternehmensgründer mit Wissenschaftlern der Fakultät für Maschinenbau der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und des Fraunhofer-Instituts für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF).

Nach Gebrauch auf den Kompost

Nach dem Pressen werden die Rohlinge maschinell auf Bleche ausgelegt, um in Trockenkammern bei neunzig Grad Celsius getrocknet zu werden. Das beigefügte Wachs umschließt die Strohfasern, verhindert aber nicht das Entweichen der Feuchtigkeit, bis das Formteil erkaltet ist. Erst dann bildet sich ein Wachsfilm, der gegen das Eindringen von Feuchtigkeit schützt. Ähnliches bewirkt auch eine dünne Schicht aus Naturkautschuk, die im letzten Bearbeitungsschritt durch ein kurzes Tauchbad auf die Oberfläche des fertigen Werkstücks aufgebracht wird. Sie verringert zusätzlich noch den mechanischen Abrieb.

Als Rohstoffquelle für die biologische Verpackung dient überwiegend das Stroh, das beim Getreideanbau in der Region anfällt. Heute verbleibt es meist ungenutzt auf den Feldern – vorbei sind die Zeiten, in denen Viehzüchter ihre Ställe mit Stroh auslegten. Wird das Stroh »unter Dach« gelagert und so getrocknet, ist es ohne weitere Behandlung problemlos für das neue Verpackungsmaterial geeignet und bringt den Bauern sogar noch einen kleinen Ertrag. Für die in diesem Jahr angepeilte Produktionsmenge von 2500 Tonnen Retrupor genügt eine Anbaufläche von nur 200 Hektar; das entspricht ungefähr der Fläche von 200 großen Fußballfeldern.

Aus dieser Rohstoffmenge sollen zehn Millionen Fertigteile in Glindenberg entstehen. Das entspricht zwischen einem halben und zwei Prozent des deutschen Verpackungsmarktes. Zum Vergleich: Laut dem Industrieverband Kunststoffverpackungen werden hierzulande pro Jahr 25 000 Tonnen Verpackungen aus dem deutlich weniger dichten, also ergiebigeren Styropor produziert.

Das junge Unternehmen rechnet sich für die Zukunft einige Chancen aus, zumal die neue, in diesem Jahr erlassene Verpackungsverordnung zur rechten Zeit kommt. Sie verpflichtet die Hersteller von Verpackungen, ihre Produkte zurückzunehmen und sie zu entsorgen. Das Unternehmen Interseroh, eines der großen in der Entsorgungsbranche, bescheinigte Retrupor, dass die Produkte wie Altholz verbrannt oder gar kompostiert werden können. Für die Umweltfreundlichkeit des Verfahrens spricht: Das beim Verfeuern freigesetzte Kohlendioxid war zuvor von den Pflanzen aufgenommen worden. Die Entsorgung bringt also kein zusätzliches Treibhausgas in die Atmosphäre ein.

Um das Unternehmen wie geplant im Laufe des Jahres in die schwarzen Zahlen zu bringen, verbessern die Entwickler die Produkteigenschaften. So versuchen sie, einen neuen Klebstoff zu entwickeln, mit dem Retrupor-Teile beispielsweise als Transportsicherung an neuen Fenstern angeklebt und rückstandsfrei wieder entfernt werden können. Um blanke Metallteile während eines Transports gegen Korrosion zu schützen, will man dem Stroh- und Zellulosegemisch auch entsprechende Substanzen untermengen, die als Korrosionsschutz während Lagerung und Transport aus der Verpackung ausgasen. Wenn das Konzept aufgeht, wird vielleicht das Grimm'sche Märchen wahr und Stroh zu Gold versponnen. ◁

Martin Boeckh

Der Autor studierte Physik und Geografie. Er arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Gaiberg bei Heidelberg.

ASTRONOMIE HEUTE
SKY & TELESCOPE WWW.ASTRONOMIE-HEUTE.DE

Astronomen aufgepasst

hier ist eine gute Nachricht – eine sehr gute sogar:

Seit Februar 2003 gibt es eine neue hochqualitative Zeitschrift für Einsteiger, aktive Beobachter und Weltraum-Interessierte! ASTRONOMIE HEUTE, das populäre Magazin für Astronomie und Raumfahrt – die deutsche Ausgabe von Sky & Telescope, der seit über sechzig Jahren unumstrittenen weltweiten Nummer eins unter den Astronomie-Titeln. Besondere inhaltliche Schwerpunkte des zweimonatlich im Verlag **Spektrum der Wissenschaft** erscheinenden Magazins liegen auf dem Bereich der Himmelsbeobachtung sowie bei Testreports zu astronomischen Equipments. Beobachtungstipps, aktuelle News, faszinierende Fotostrecken und exklusive Kolumnen wie »Kippenhahns Sternstunde«, runden das einzigartige redaktionelle Angebot ab.

Lernen Sie ASTRONOMIE HEUTE kennen und profitieren Sie von den Vorteilen eines Miniabonnements

✔Preisvorteil:
Testen Sie 2 aktuelle Ausgaben von ASTRONOMIE HEUTE zum Sonderpreis von nur 9,– €.
Die Versandkosten Inland sind in diesem günstigen Preis bereits enthalten.

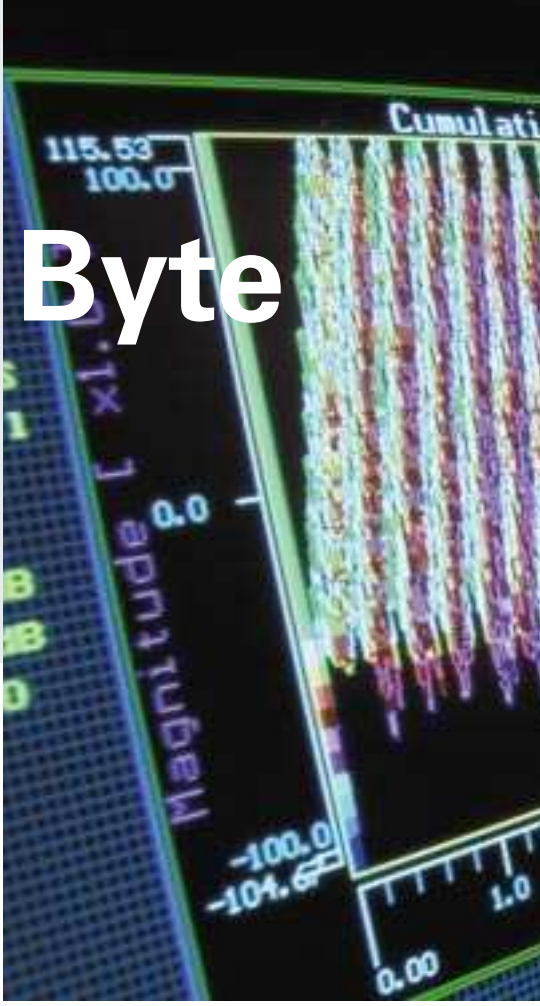
✔Kostenlose Kleinanzeigen:
Als Abonnent von ASTRONOMIE HEUTE können Sie eine kostenlose Kleinanzeige (bis zu fünf Zeilen) in ASTRONOMIE HEUTE sowie im Internet schalten.

EINE BESTELLMÖGLICHKEIT FINDEN SIE AUF DEM BEIHEFTER ODER IM INTERNET UNTER

WWW.ASTRONOMIE-HEUTE.DE

DIGITALE MUSIKTECHNIK

Vom Beat zum Byte



Ob Mozart oder Metallica, Ethnopop oder Volksmusik – ohne Digitaltechnik kommt die kommerzielle Musikproduktion kaum noch aus. Der neueste Trend: Der Alleskönner Computer macht sich im Studio unentbehrlich.

STUDIOTECHNIK

Die Festplatte als Bandmaschine

Computersoft- und -hardware ersetzen mehr und mehr das kostspielige Equipment der Aufnahmestudios. Hinter den bunten Benutzungsoberflächen wirken überraschend komplexe Algorithmen.

Von Klaus-Dieter Linsmeier

Vor 22 Jahren geriet die Welt der Musikliebhaber aus den Fugen: Die Unternehmen Sony und Philips präsentierten die gemeinsam entwickelte Compact Disk. Die dünne Scheibe aus Kunststoff und Aluminium schickte sich rasch an, die Schallplatte zu verdrängen. Ein Laser ersetzte die Abtastnadel, mikroskopische Vertiefungen im Kunststoff das Rillenmuster. Damit war nicht nur die Ära des Grammofons endgültig zu Ende: Die Digitalisierung der Musikindustrie hatte begonnen.

Sammler kam die Umstellung teuer zu stehen, war doch der in jahrelanger Leidenschaft gefüllte Phonoschrank samt Plattenspieler bald eine Antiquität. Aber auch Tonstudios mussten kostspielig auf die digitale Technik umrüsten. Sie benötigten Analog-Digital-Wandler (A/D), die Schall bei der Aufnahme in einen Strom von Bits und Bytes umsetzten, und das Pendant für den umgekehrten Weg, D/A-Wandler. Hinzu kamen spezielle Bandmaschinen, um den binären Datenfluss zu speichern, mit digitalen Signalprozessoren (DSP) ausgestattete Effektgeräte und Filter für die Klangbearbeitung.

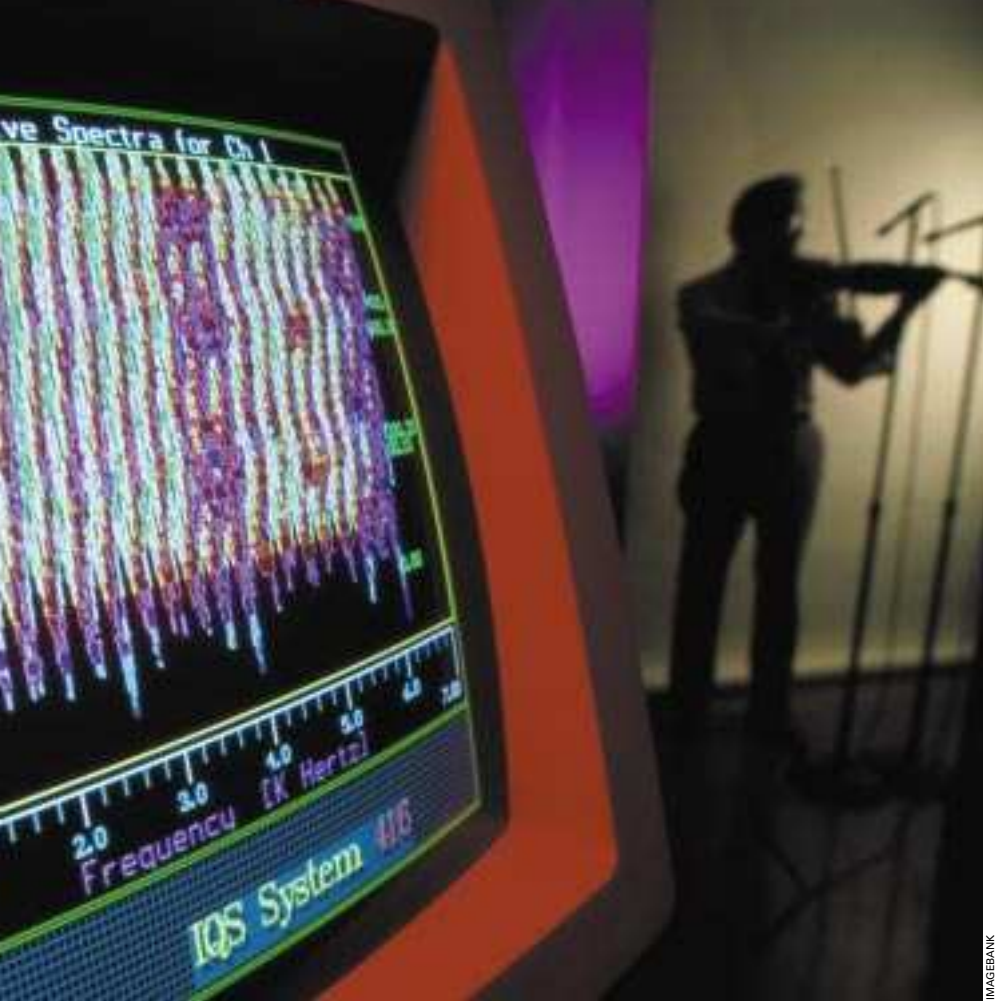
Vor einigen Jahren begann eine neue Phase dieser Entwicklung: Computer ermöglichten es, mit spezieller Hard- und Software aufgerüstet, kostspielige digitale Spezialsysteme zu ersetzen. Im Profistudio dienen sie seit rund fünf Jahren beispielsweise zum Schnitt und Arrangement von Aufnahmen, als Steuerzentrale für digitale Mischpulte und Harddiskrekorder (also Aufnahmegeräte, die auf Festplatte statt Magnetband speichern) sowie zur Endabmischung, dem »Mastering«.

Steile Filter, flacher Klang

Eine schnelle CPU, viel Arbeitsspeicher und eine große Festplatte sind die Grundvoraussetzung, denn digitalisierter Klang erzeugt große Dateien. Analog-Digital-Wandler und ihre Pendants ergänzen die Hardware (für den Hobbybereich reichen die entsprechenden Komponenten der Soundkarten).

Das zentrale Programm, das alle Hard- und Software steuert, ist der Audio-Sequenzer. Dessen Funktion und grafische Anmutung ähneln einer Bandmaschine: Jedes Instrument erhält eine eigene Spur (siehe Bild Seite 80). Bei synthetischen Klangerzeugern speichert diese alle Steuerbefehle im zeitlichen Ablauf, beispielsweise vereinfacht »Achtung Klavierspur: Ton C an, volle Lautstärke, Ton C aus«. Audiospuren entsprechen den Aufnahmen »echter« Instrumente. Drei der weltweit wichtigsten Audio-Sequenzer kommen aus deutschen Landen: »Samplitude«, ein Produkt im Vertrieb der Berliner Magix AG, »Logic Audio« von Emagic in Rellingen sowie »Cubase« aus der Hamburger Software-Schmiede Steinberg.

Wer als Anwender mit Audio-Workstations arbeitet, dem bleibt die Komplexität der Technik hinter grafischen Benutzungsoberflächen verborgen. Die Probleme beginnen bereits mit dem Digitalisieren eines Tones, beispielsweise eines via Mikrofon dem Rechner zugeführten Gesangsparts. Die in Amplitude und Zeit kontinuierlichen Schallschwingungen müssen in hinreichend kurzen Zeitabständen gemessen und als binäre Zahl gespeichert werden. Was auch immer in den folgenden Prozessen mit dem Schallsignal geschehen soll, reduziert sich somit auf eine numerische Operation an einzelnen Datenworten: Um zum Beispiel ein Signal zu glätten – was gleichbedeutend mit einem Herausfiltern hoher Frequenzen ist –, ersetzt der Computer jeden Abtastwert durch eine Mittelung des ursprünglichen Datums mit den Werten des vorherigen und des folgenden.



IMAGEBANK

Vom Mikrofon direkt in den Computer: Digitale Technik erobert die Aufnahmestudios. Sie hilft, Kosten einer Musikproduktion zu senken, ermöglicht aber auch Manipulationen am Klangmaterial.

Obwohl das kontinuierliche Signal durch diskrete Werte repräsentiert wird, darf keine hörbare Information verloren gehen. Für die CD hatten Sony und Philips deshalb folgendes Format festgelegt: Zur Angabe der Amplitude stehen in Stereo 16 Bit zur Verfügung, also 65 636 ganze Zahlen für den gesamten Aufnahmebereich zwischen der minimalen und der maximalen Lautstärke; die zeitliche Abtastung erfolgt mit 44,1 Kilohertz, 44 100-mal pro Sekunde.

Die Amplitudenauflösung orientierte sich an der Technik von 1981 – ein Datenwort war normalerweise 16 Bit groß – , der zweite Wert folgte aus dem Nyquist-Theorem: Die Rate der Abtastung (fachlich Sampling) muss mindestens doppelt so hoch sein wie die höchste im Spektrum des analogen Signals auftretende Frequenz. Eine höhere würde sonst fälschlicherweise in tiefere Bereiche des Spektrums gespiegelt und den Klang bei der Wiedergabe stören (siehe Grafik auf der nächsten Seite). Das CD-Format berücksichtigt die obere Hörgrenze des Menschen von etwa 20 Kilohertz, eine Rate von 44,1 Kilohertz scheint mehr als ausreichend. Doch höher frequente Signalanteile kommen in natürlichen Klängen durchaus vor. Auch wenn wir sie normalerweise nicht hören, müssen sie vor dem Sampling durch Filter entfernt werden.

Die aber verändern die Phasenlage des Signals, verschieben also die Komponenten seines Spektrums gegeneinander. Dieser Effekt ist umso größer, je steiler ein Filter arbeitet, und das ist beim CD-Standard der Fall: Während am Ende des Hörbereichs von 20 Kilohertz noch alle Signalanteile durch den Wandler kommen müssen, sollten bei 22,05 Kilohertz (der halben Abtastfrequenz) alle höheren Frequenzen eliminiert sein. Die resultierenden Phasenverschiebungen lassen die Musik mitunter etwas verwaschen klingen. Aus diesem Grund arbeitet modernes Studioequipment – und auch das neue Format der Audio-DVD – mit 96 Kilohertz. Damit hat ein Filter sozusagen nach oben hin Luft – erst ab 48 Kilohertz muss alles Weitere entfernt sein. Dementsprechend lässt er sich flacher auslegen, und Phasenänderungen werden minimiert.

Auch hinsichtlich der Pegeldarstellung geht der Trend zur höheren Auflösung: Anspruchsvolle A/D-Wandler bieten mittlerweile bis 24 Bit statt nur 16. Ein solches Datenwort vermag nun schon 16 777 216 statt 65 636 Werte darzustellen. In beiden Fällen definiert der Wert 0 die maximale Lautstärke, im ersten Fall beträgt sie 96 Dezibel, im zweiten 144 Dezibel (siehe Glossar unten). Anders ausgedrückt: Jedes Bit mehr erweitert die Auflösung um sechs Dezibel.

Das verschafft Reserven. Ein Streichquartett bereitet mit 16 Bit noch keine Probleme. Dessen Dynamik, also der Abstand zwischen leisester und lautester Stelle, umfasst etwa 75 Dezibel. Anders bei einem Sinfoniekonzert: Eine Aufnahmedynamik von 95 Dezibel lässt kaum Luft für die üblichen Sicherheitspuffer zum Schutz vor Übersteuerungen.

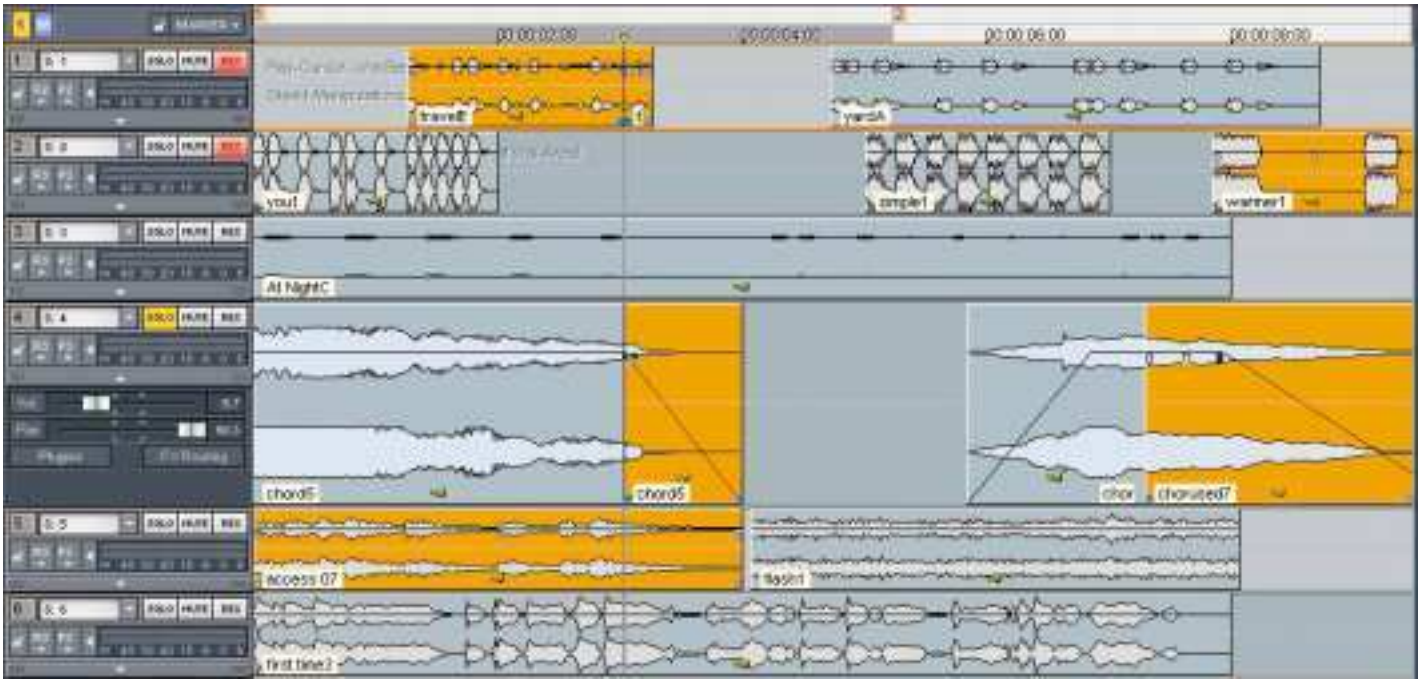
Besonders deutlich zeigen sich die Vorteile von 24 Bit aber bei sehr leisen Passagen eines Musikstücks, beispielsweise bei einer Pianissimo-Stelle in einem Musikstück. Diese stellt sich bei 16 Bit im Wertebereich zwischen etwa 16 und 256 dar, bei 24 Bit zwischen 4096 und 65 536 – das Raster gerade am unteren Ende der Lautstärkeskala wird somit sehr viel feiner und damit genauer. Das reduziert zudem die so genannte Quantisierungsverzerrung: Wenn der A/D-Wandler beim Abtasten zwischen zwei ganzen Zahlen entscheiden muss, zum Beispiel zwischen 124 und 125, macht er einen winzigen Fehler, wenn das Signal in Wirklichkeit dazwischen liegt. Den sollen sehr geschulte Ohren als feines Rauschen hören können.

Hersteller professioneller Produktionssysteme empfehlen deshalb mittlerweile, die gesamte Verarbeitung mit einer 24-Bit- ▷

GLOSSAR

▶ In **Dezibel** wird der Pegel I eines Signals relativ zu eine Referenz I_0 gemessen: $S = 10 \log (I/I_0)$. So bezieht man beispielsweise die Lautstärke von Schall gemeinhin auf die Hörschwelle des menschlichen Ohres.

▶ Der minimale akustische **Schallpegel** beträgt also null Dezibel. Bei der Aufnahme eines Musikstücks hingegen entspricht I_0 nach Konvention der Passage maximaler Lautstärke, null Dezibel misst dort der maximale Aufnahmepegel.



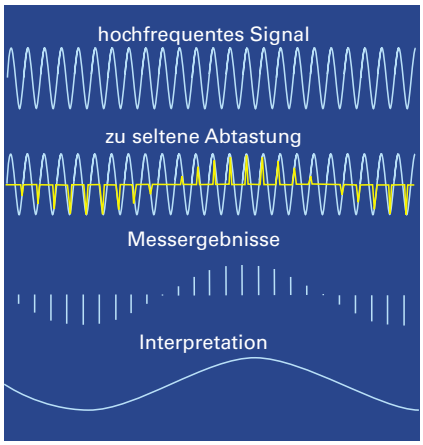
MAGIX AG

Auf der Bedienungsoberfläche eines Audio-Sequenzers werden Tonspuren eines Arrangements untereinander angeordnet. Links davon erscheinen Funktionen wie Record (Aufnahme) und Mute (Stummschalten) und eine Pegelanzeige. Spur vier wurde in diesem Beispiel vergrößert, um durch Zeichnen von Geraden den Klang einzelner Aufnahmen ein- beziehungsweise auszublenden.

▷ Auflösung durchzuführen, denn jeder Zwischenschritt mit kleineren Datenworten mindert wieder die Klangqualität. Außerdem setzen neuere Programme die Daten in das 32-Bit-Fließkomma-Format um, das eine Bearbeitung mit einem Dynamikumfang von 150 Dezibel erlaubt.

Liegen die Amplituden erst einmal in digitaler Form vor, in welcher Auflösung auch immer, offerieren die Computerstudios vielfältige Möglichkeiten zur Bearbeitung. Schon beim Schneiden und Kleben der virtuellen Tonspuren offenbaren sich die Stärken. Ohne die Originaldaten anzugreifen, lassen sich Ausschnitte markieren und zu einem Ganzen verschmelzen.

Erfolgt die Abtastung zu selten, wird das Ergebnis als Schwingung geringerer Frequenz falsch interpretiert.



THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Vielseitigkeit digitaler Technik wird aber nirgends deutlicher als bei der Arbeit mit Effekten. Als Beispiel diene der in der Popmusik wichtige Hall. Reflexionen an den Wänden eines Raumes verändern den Klang, verwaschen ihn auch je nach Rauigkeit der Wände. Manch ein Fan wäre wohl enttäuscht, würde er seinen umjubelten Popstar ohne Hall vernehmen: Der Effekt verleiht Fülle. Andererseits kann er im Übermaß auch den Klang verschmieren.

Die nur digital zufrieden stellend zu simulierende Wirkung großer Räume entsteht aus der Überlagerung einer Vielzahl verzögerter Signale zusammen: Für jede Sekunde Nachklang werden bei 44,1 Kilohertz zeitlicher Auflösung für eine exakte Nachbildung des Raumeindrucks auch 44 100 verzögerte Signale benötigt. Digitale Hallgeräte sind damit überfordert. Sie erzeugen durch Rückkopplungen lediglich einen synthetisch wirkenden Effekt. Moderne Spezialsoftware hingegen verrechnet die diskreten Pegelwerte des Signals mit den Messwerten einer »Hallantwort« auf ein impulsartiges Ereignis und erreicht so einen natürlich klingenden Hall.

Noch setzen professionelle Studios derartige Software selten für Effekte ein, denn die Rechner erreichen erst seit kurzem die Leistungsfähigkeit spezieller Hardware. Die Entwicklung ist aber in vollem Gange. Zudem öffnet sich dem Computer mit wachsender Taktzahl das Feld der Livemusik. Denn all das über Arrangement und Effekte Gesagte gilt derzeit nur für die Aufnahme. Die Echtzeit-Bearbeitung ist bei vielen Algorithmen noch zu aufwendig. Auf der Bühne aber will der Musiker kreativ mit seinem Instrumentarium umgehen, und das kostet in der digitalen Audiowelt Rechenleistung. Doch die scheint nur eine Frage schnellerer Prozessoren und besserer Algorithmen zu sein. ◁

Klaus-Dieter Linsmeier ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«. Für die fachliche Beratung dankt er dem Unternehmen Magix AG.

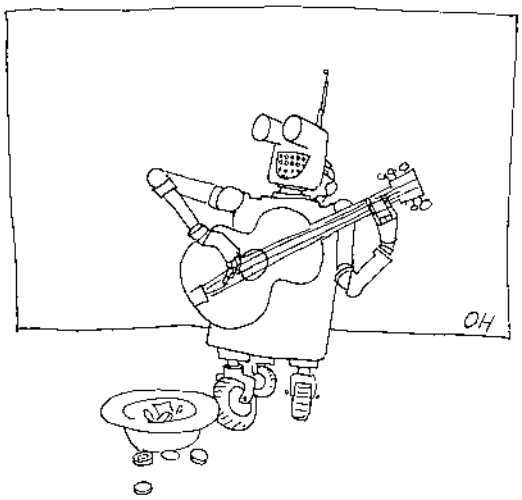
Literaturhinweise

Aspekte des Native Signal Processing mit Audiomaterial in hoher Auflösung. Von Georg Flemming. Vortrag auf der 20. Tonmeistertagung in Karlsruhe 1998. Abzurufen unter www.magix.com.

Digitale Audiosignalverarbeitung. Von Uwe Zölzer. Verlag B. G. Teubner, 1997.

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Angriff der Klon-Musiker



»Kunst kommt von Können« lautet eine alte Weisheit. Doch moderne Musikproduktionen kommen heute oft ohne Virtuosen aus. Schwierige Passagen meistert die Computertechnik.

Von Holger Landau

Studiozeit ist teuer, da kommt es oft billiger, wenn Software eventuelle Patzer von Musikern korrigiert. Ein typisches Szenario aus der Produktion von Popmusik sieht deshalb heute so aus: Mit Hilfe so genannter Sequenzerprogramme (siehe vorigen Beitrag) spielt ein einzelner Musiker nacheinander die verschiedenen Instrumente eines Arrangements direkt in den Computer ein. Meist dient eine Keyboardtastatur als universelles Eingabegerät. Allerdings lassen sich damit nur bedingt die Eigenheiten von Saiten- oder Blasinstrumenten simulieren, deshalb gibt es auch entsprechende Alternativen wie »Blaswandler« und spezielle Gitarren.

Den gewünschten Klang erzeugt digitale Elektronik, sei es die Software-Simulation, sei es ein so genannter Sampler, der gespeicherte Töne echter Instrumente abruft und verarbeitet (Spektrum der Wissenschaft 11/1997, S. 74 und 5/2001, S. 85). Was im Zusammenspiel nach Piano, Gitarre, Rhythmusgruppe, Streichorchester oder Bläsersektion klingt, entstammt oftmals Siliziumchips. Selbst die Instrumente der analog-elektronischen Ära der 1970er Jahre wie Moog-Synthesizer oder Hammondorgel werden mittlerweile kostengünstig durch Computerprogramme wieder zum Leben erweckt.

Für kleine Produktionen mit knappem Budget reichen heute schon ein leistungsfähiger PC oder Macintosh, ein gutes Gesangsmikrofon und einige hochwertige Klangerzeuger. Damit lässt sich ein komplettes Arrangement auf Festplatte bannen, bearbeiten, abmischen und zum Schluss auf CD brennen. Auch Effekte wie Hall und Verzerrung liefert oft die Software, und zwar dank ausgefeilter Algorithmen mit einer Klangqualität, die es mit spezieller Hardware durchaus aufnehmen kann. Auch die Kosten sind vergleichbar: So schlägt ein gutes Hallgerät etwa mit 800 Euro zu Buche, ein Sequenzerprogramm dieser Preisklasse liefert den Halleffekt als Teil der Ausstattung gleich mit.

Damit Klangerzeuger und Computerprogramme einander verstehen,»sprechen« all diese Geräte eine gemeinsame Sprache: Midi, das *Musical Instrument Digital Interface*. Dieser Standard aus den 1970er Jahren sorgt für einen reibungslosen Datenaustausch. Die Midi-Daten enthalten zum Beispiel alle Angaben über Ton, Notenhöhe, Tonlänge und Anschlagstärke, nicht aber die Klänge selbst. Dementsprechend erfordern reine Midi-Songs nur wenige Kilobyte Speicherplatz. Vor allem aber lassen sich diese Daten fast unbegrenzt manipulieren: So kann der Musiker Passagen stückweise, ja sogar Note für Note und, wenn es sein muss, per Computertastatur einspielen.

Ein falscher Ton lässt sich schnell beheben, indem man ihn etwa bei grafischer Darstellung im Notensystem mit der Maus auf die gewünschte Tonhöhe verschiebt. Stimmen die Töne, doch der Rhythmus ist nicht sauber, legt der Computer ein zeitliches Raster über die Einspielung (fachlich Quantisierung): Er richtet beispielsweise die »Note on«-Befehle für die Klangerzeuger auf sechzehntel Noten als Grundeinheit aus. Erscheint das Ergebnis dem Produzenten zu exakt und damit steril, können die Programme auch Muster für die Rhythmus-Quantisierung aus »echten« Aufnahmen eines Schlagzeugers extrahieren. Diese Muster enthalten dann all die feinen Abweichungen gegenüber einem fixen Raster, die beim Hörer das Gefühl von kreisender oder vorwärts drängender Bewegung vermitteln, die von Musikern als Groove bezeichnet wird.

Doch auch Midi-Noten müssen komponiert werden. Spezielle CDs mit Bibliotheken aus kurzen Musiksequenzen sparen ▷

EMAGIC / LANDAU

Hat der Sänger den Ton nicht getroffen? Ist die Gitarre zu schnell eingespielt? Professionelle Sequenzer können digitalisierte Aufnahmen korrigieren, vollbringen aber noch keine Wunder. Die »Time & Pitch-Machine« der Firma Emagic lässt sich dazu durch Bewegen der blauen Kugel mittels Mausklick steuern oder durch gezielte Eingabe von Parametern. Im Hintergrund die Wellendarstellung der zu bearbeitenden Datei.

▷ Zeit und Einfälle. Diese »Tonfragmente« umfassen meist wenige Takte, beispielsweise mit Blues-typischen Gitarrenriffs in allen Tonlagen. Wer sich ausschließlich aus dem Baukasten bedient und das Können anderer klont, wird freilich kaum Originelles schaffen. Doch sparsam eingesetzt, können instrumentale Zitate dem musikalischen Menü interessante Geschmacksnoten verleihen.

Auf solche Weise lassen sich auch einfache Vokalfragmente einbinden, aber keine Gesangspassagen kreieren. Korrekte Intonation und das rhythmisch richtige Setzen der Worte brauchen viel Übung, von der gewünschten Fülle der Stimme ganz abgesehen. Doch in gewissen Grenzen vermag auch hier die Technik zu helfen. Rhythmisch verpatzte Gesangspassagen, einmal digitalisiert und auf der Festplatte gespeichert, lassen sich schneiden und die Schnipsel gegeneinander verschieben. Das benötigte Werkzeug ist ein Welleneditor, ein Programm, dass den Amplitudenverlauf des Schalls grafisch darstellt (siehe Bild vorige Seite).

Auch falsch intonierte Passagen lassen sich mitunter korrigieren. Noch vor wenigen Jahren hätte eine Tonhöhenänderung den Klang der Stimme verändert. Drastisches Anheben ergab beispielsweise den bekannten Mickymaus-Effekt. Der Grund waren Formanten genannte charakteristische Muster im Frequenzspektrum, die den Klangcharakter einer Stimme ausmachen (sie entstehen durch Resonanzverstärkung der von den Stimmbändern erzeugten Schwingungen durch anatomische Gegebenheiten). Moderne Editoren, oft Bestandteil hochwertiger Sequenzer, erkennen und erhalten sie und damit die individuelle Stimme.

All diese Techniken machen aus einem unmusikalischen Komponisten keinen Mozart, aus einem wenig versierten Gitarristen keinen Eric Clapton und aus einer schwachen Sängerin keine neue Callas. Doch auch weniger geübten Musikern gelingen damit zumindest für den kommerziellen Markt brauchbare Ergebnisse. Freilich: Kreativen Könnern, die Instrument, Kompositionslehre und Technik beherrschen, bietet die digitale Trickkiste Arbeitserleichterung und eine schier unbegrenzte Möglichkeit zur Realisierung neuer Ideen. ◁

Holger Landau studierte Informationselektronik. Er war als Musiker an Studioproduktionen beteiligt und als Redakteur bei der Zeitschrift CHIP tätig. Heute ist er freier Journalist in Reichenau am Bodensee.

CINETEXT

GITARRENVERSTÄRKER

Virtuelles Röhren-Glühen

Soll die E-Gitarre mal nach Hendrix, mal nach Beatles klingen, wechseln Musiker heute nicht mehr die Verstärker, sondern ändern die Einstellung ihres *virtual amp*.

Von Marcus Ryle

Die elektrische Gitarre zu erfinden, hatte einen simplen Grund: Gegen das Klangvolumen einer Bigband kam das rein akustische Saiteninstrument zu Anfang des 20. Jahrhunderts nicht mehr an. Deshalb begannen Bastler und Elektroingenieure, die Schwingungen der metallenen Saiten durch Elektromagnete in elektrische Signale zu verwandeln – die Veränderung des Magnetfelds induziert eine schwache Spannung in den Spulen der Tonabnehmer (fachlich Pickups).

Um dieses Signal zu verstärken, stand die Röhrentechnik des noch jungen Rundfunks zur Verfügung (siehe Glossar). Eigentlich sollten diese Schaltungen die Signale nur linear verstärken, doch wenn man die Geräte nur genug aufdrehte, begannen sie auch zu verzerren. Diese Distortion wurde schnell zum Klangcharakteristikum der E-Gitarre und bildete die Basis neuer Musikstile wie Blues, Rock 'n' Roll bis hin zu den heutigen Spielarten des Rock.

Das Besondere aber war: Verschiedene Verstärker klingen anders. Das liegt unter anderem an den verwendeten Röhren mit ihren jeweils eigenen Kennlinien sowie an den elektronischen Schaltungen. Zum Beispiel gehören zum Sound der Beatles Verstärker der Firma Vox, während Jimi Hendrix Geräte von Marshall bevorzugte. Aber: Schon ein Wechsel von Komponenten-Zulieferern verleiht einem Modell ganz andere Eigenheiten.

Um ihren eigenen Sound zu finden beziehungsweise je nach gefordertem Musikstil zu variieren, mussten Gitarristen oft eine ganze Batterie an Verstärkern erwerben. Auch heute noch bringen ältere, aber legendäre Geräte bei Versteigerungen Spitzenpreise, trotz der Empfindlichkeit von Vakuumröhren gegen Temperaturschwankungen und Feuchte. Denn Transistorgeräte, kurzzeitig als Alternative gehandelt, klingen oft zu steril, da sie strikt linear verstärken. So genannte Feldeffekt-Transistoren sollten den Klang etwas »schmutziger« machen, da ihre Kennlinie ähnlich der einer Röhre verläuft. Aber auch das stellte Musiker nicht zufrieden.

Erst die Entwicklung digitaler Signalprozessoren eröffnete in den letzten Jahren

GLOBAL PICTURES / TG ZWEI

Zwei Musikstile, zwei Verstärker. Während die Beatles für ihren Sound die Geräte der englischen Firma Vox verwendeten, setzte Jimi Hendrix auf Produkte von Marshall. Noch heute steht Vox für einen eher reinen, Marshall für einen verzerrten Klang.

neue Möglichkeiten, den Geldbeutel zu schonen und künstlerische Freiheiten auszubauen. Die virtuellen Verstärker bilden die analoge Röhrensysteme weitgehend getreu nach. Sie liefern eine ganze Palette an Amps, verpackt in einem handlichen, preisgünstigen Produkt.

Am Anfang einer solchen Verstärker-Simulation steht die Analyse des realen Vorbilds. Es besteht aus einer Eingangsstufe, der das Spannungssignal der Tonabnehmer zugeführt wird. Darauf können mehrere Verstärkerstufen folgen. Regler beeinflussen den Klang, fördern beispielsweise gezielt tiefe Töne. Schließlich setzt ein Transformator das Signal noch einmal um, sodass es den nachfolgenden Lautsprechern optimal angepasst ist.

Prinzipiell ließe sich jedes Bauteil einer solchen Schaltung in einer Software nachbilden. Chip-Designer testen ihre Entwürfe auf dem Rechner, bevor sie einen realen Prototyp anfertigen. Leider wäre ein derart detaillierter Ansatz viel zu zeit- und rechenaufwendig. Stattdessen simulieren virtuelle Verstärker komplette Baugruppen, insbesondere Röhren, Reglerschaltungen und Lautsprecher. Vor der mathematischen Modellierung steht freilich das Messen und Analysieren. Zum Beispiel untersuchen wir die Frequenzantwort einer Baugruppe: Wir speisen einen Ton bestimmter Amplitude ein und messen den Output, dabei durchfahren wir das gesamte Frequenzspektrum.

Vakuumröhren haben eine nicht-lineare Kennlinie, das heißt: Einer wachsenden Eingangsspannung vermag die Ausgangsspannung schließlich nicht mehr im selben Maße zu folgen, und das Signal verzerrt. Im einfachsten Fall eines reinen Sinustones werden seine Amplituden schlicht gekappt (fachlich »Clipping«, siehe Grafik nächste Seite). Zerlegt man eine solchermaßen gestörte Welle mittels Fourier-Analyse in ihre spektralen Bestandteile, wird offensichtlich: Dem Sinusgrundton haben sich zahlreiche Obertöne (siehe Glossar unten) zugemischt. Aus diesem Grund erscheint der Klang heller und komplexer.

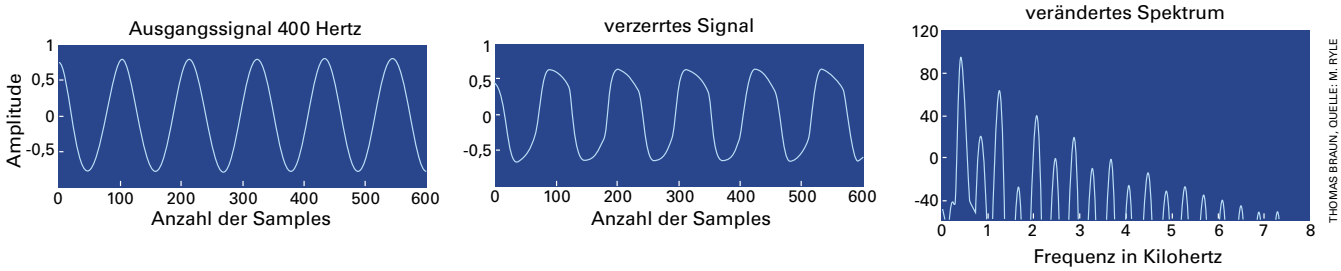
Um dieses Verhalten nachzubilden, haben wir die Kennlinien gängiger Röhrentypen vermessen und mathematisch approximiert. Um die daraus resultierenden mathematischen Modelle auf digitalen Signalprozessoren durchzurechnen, müssen die analogen Spannungswerte zuvor in Bits und Bytes umgesetzt werden. Gerade Nichtlinearitäten können dabei Probleme bereiten. Nach dem Nyquist-Theorem kann ein solcher Analog-Digital-Konverter keine Frequenz richtig wiedergeben, die größer ist als sein doppelter Arbeitstakt. Mit anderen Worten: Die im CD-Format übliche maximale Frequenz von 22,05 Kilohertz setzt voraus, dass das Digitalisieren (Sampling im Fachjargon) mit mindestens 44,1 Kilohertz erfolgt. Höhere Frequenzen im Signal werden dem niederfrequenten ▷

GLOSSAR

WWW.VOXAMPS.DE

▶ **Die Verstärkerröhre** wurde Anfang des 20. Jahrhunderts erfunden. Ihre Kathode wird erhitzt, sodass Elektronen aus ihrer Oberfläche austreten und zur Anode fliegen. Das Nutzsignal – zum Beispiel einer E-Gitarre – liegt am Gitter an, erzeugt eine Gegenspannung und moduliert den Elektronenfluss. Der Transistor hat die Röhre aus vielen Bereichen der Elektronik, doch nicht aus der Musik verdrängt. Bis auf eine modernere Vedrahtung entspricht der heutige Vox AC30 dem von den Beatles genutzen Verstärker.

▶ Der Klang eines Instruments lässt sich als **Frequenzspektrum** darstellen. Es besteht aus einem periodischen Grundton und dessen Vielfachen, den Obertönen. Ist das Frequenzverhältnis ganzzahlig (etwa 1 : 2), wird es als harmonisch bezeichnet; gebrochene Relationen wie 1 : 1,2 kennzeichnen Klanggemische etwa von Glocken. Geräusche bestehen aus unharmonischen Folgen nicht-periodischer Schwingungen.



Wird ein Röhrenverstärker hochgedreht, verzerrt er schließlich das Eingangssignal – es wird gekappt (Mitte). Aus einem einfachen Sinus (links) entsteht dann eine obertonreiche Schwingung, wie das Spektrum (rechts) zeigt.

▷ Teil des Spektrums zugeschlagen und erzeugen unschöne Artefakte. Entstehen durch das Clipping des Ausgangssignals – das im Extremfall aus einer Sinus- eine Rechteckkurve macht – zahlreiche Obertöne, kann diese Grenze leicht überschritten werden. Eine Lösung ist das Oversampling: Noch vor dem Modellieren der Nichtlinearität wird das Eingangssignal mit wesentlich höherer Rate erneut digital abgetastet. Kritische Obertöne lassen sich nach der Berechnung herausfiltern.

Deutlich weniger Ansprüche an die Modellierung stellen die Regler vor und hinter den Röhrenstufen, denn sie arbeiten meist linear. Anhand des Schaltplans und ihrer Frequenzantwort lässt sich der Einfluss dieser Komponenten auf den Klang analysieren. Einige Verstärker kennen nur einen einzigen Regelknopf, andere trennen in die drei Frequenzbereiche Bass, Mitten und Höhen. Im Prinzip arbeiten sie als Filter, deshalb werden sie auch durch entsprechende mathematische Modelle nachgebildet. Allerdings lässt sich oft nur schwer voraussagen, wie drei Regler interagieren.

Bei unseren Messungen und Modellentwicklungen erlebten wir auch manche Überraschung. Denn die Nichtlinearität einer Verstärkerstufe wird vom gesamten Schaltkreis erzeugt, selbst von der Spannungsversorgung. Mitunter fanden wir, dass die Elektronik bei bestimmten Frequenzen oder Amplituden eine Gleichspannung erzeugte, die sich dem Signal überlagerte. Dabei entstand eine asymmetrische, verzerrte Wellenform, das heißt neue Obertöne. Tatsächlich trug dieses vom Hersteller sicher nie beabsichtigte Verhalten seiner Schaltungen durchaus zum charakteristischen Klang bei. Bei anderen Produkten fanden wir, dass die kapazitiven Filter, die das 50-Hertz-Signal der Netzspannung herausfiltern sollen, bei großen Lautstärken versagten. Das Ergebnis: Das Audio-Signal wurde mit der Netzfrequenz moduliert, und zwar je nach Amplitude unterschiedlich stark. Dieser eigentlich höchst unerwünschte Effekt gehörte in diesen Fällen tatsächlich zum Klang der Geräte.

Die letzten Glieder in der Signalkette eines Verstärkers sind die Boxen, also die Kombination aus Lautsprecher und Gehäuse. Eine nach hinten offene Box entwickelt mehr mittlere Frequenzen, eine geschlossene beeindruckt durch ihre Tiefen, Lautsprecher beeinflussen sich gegenseitig. Die Modellierung ist in der Theorie anspruchsvoll, in der Realisierung einfach: Wir zeichnen die Frequenzantwort dieser Komponente auf einen scharfen Impuls auf, speichern sie und verknüpfen sie mit dem Output des Transformators. Mathematiker sprechen von einer Faltung, doch in der digitalen Welt wird daraus eine schlichte Multiplikation der Daten.

Ein virtueller Verstärker soll auf der Anlage des Musikers so klingen, als höre er die Mikrofonaufnahme des realen Vorbilds. Kritiker bemängeln einen synthetischen Sound und befürchten, dass Gitarristen bald nicht mehr das Original als Referenz nehmen, sondern die Simulation. Diese Argumentation trifft meines Erachtens nicht die Wirklichkeit. Zwar erklären Gitarristen beim direkten Vergleich von Röhrenverstärker und Simulation, der Erstere klänge wärmer, irgendwie besser. Doch diese Unterscheidung setzt voraus, dass sie wissen, welches Gerät sie momentan spielen. Beim Blindtest unter kontrollierten Bedingungen gelingt ihnen die Differenzierung nicht mehr. ◁

Marcus Ryle ist Leiter der Entwicklungsabteilung von Line 6, einem amerikanischen Hersteller simulierter Gitarrenverstärker.

Eine elektrische Gitarre lässt sich über GuitarPort von Line 6 mit dem Computer verbinden. Die zugehörige Software nutzt dessen Hardware, um Verstärker und Effekte zu simulieren (oberer Teil der abgebildeten Bedienoberfläche, hier ein 1969 Fender Bassman mit seinen typischen Reglern). Der besondere Clou an diesem Gerät: Es verbindet den Musiker mit einer speziellen Webseite. Dort kann er kostenpflichtig Unterrichtsmaterial und Hörbeispiele herunterladen, in diesem Fall eine Lektion des Jazzgitarristen Joe Satriani: Das World Wide Web als Alternative zum Lehrbuch.

GEMA

Bild und Ton im Takt

Zu den Auswirkungen der Digitaltechnik auf die Produktion von Musik befragte »Spektrum der Wissenschaft« den Saxofonisten Klaus Doldinger, der seit 1971 mit seiner Band Passport eine feste Bank des Rock-Jazz in Deutschland ist. Der studierte Musikwissenschaftler und gelernte Tonmeister komponiert zudem Filmmusik. Zu seinen bekannteren Produktionen gehören die Musik zu »Das Boot« und »Die unendliche Geschichte« sowie die Erkennungsmelodie zur Kriminalfilmreihe »Tatort«.

Spektrum der Wissenschaft: Ist die Digitaltechnik für den Musiker Segen oder Fluch?

Klaus Doldinger: Beides. Sie spart zum Beispiel Zeit und Mühe. Heute liefert man dem Presswerk nur noch eine CD oder ein DAT-Band mit allen Daten, früher musste man aus einem Masterband erst eine so genannte Matrize herstellen und damit eine Probepressung vornehmen. Wir brauchten manchmal ein Dutzend Anläufe und mehr, bis das Ergebnis so klang, wie wir das wollten. Da mussten nur die Tonköpfe der Bandmaschinen im Presswerk anders eingemessen sein als bei uns, schon gab es Abweichungen.

Spektrum: Der Produktionsprozess ist jetzt also durchgängiger geworden?

Doldinger: Und das verbessert die Qualität, denn zwischen der CD und dem Masterband gibt es praktisch keine hörbaren Unterschiede mehr. An dieser Stelle zeigt sich aber auch die Kehrseite der Medaille. Es ist sehr leicht geworden, hochwertige Kopien anzufertigen, und Produzenten wie Künstler gehen dann leer aus.

Spektrum: Mancher Musikliebhaber trauert dennoch der Analogtechnik nach, weil sie angeblich besser klang.

Doldinger: Einige meiner Freunde favorisieren tatsächlich die Vinyl-LP, und viele DJs arbeiten bevorzugt damit. Aber wir haben einmal analoge und digitale Aufnahmen gleichzeitig gemacht und hörten kaum Klangunterschiede. Eine weibliche Stimme, begleitet von Gitarre oder Klavier, in einem Raum mit guter Akustik vorgetragen, die klang in analoger Technik subjektiv besser, wärmer. Aber ich bin da sehr vorsichtig, zumal das letzte Wort bezüglich der technischen Standards noch nicht gesprochen ist. Heute produzieren wir noch im 16-Bit-Standard. Über kurz oder lang wird das auf 24 Bit rutschen, mit einer Samplingrate von 96 Kilohertz. Damit verbessert sich die Klangqualität, die Dateien werden allerdings auch größer.

»Was früher oft dem Zufall überlassen war oder nur mit sehr vielen Klimmzügen gelang, läuft nun viel effizienter ab«, erklärt Klaus Doldinger.

Spektrum: Sie sind Musiker und Komponist. Welche Rolle spielen der Computer und Klangerzeuger in der kreativen Phase Ihrer Arbeit?

Doldinger: Ich entwickle meine Arrangements heute mit Keyboard und Sequenzer, spiele also alle Stimmen zunächst selbst ein. Das hat eine Reihe von Vorteilen. Dazu gehört, dass so ein Programm ein gutes Notenbild erzeugt, während ich früher per Hand notieren musste. Vor allem aber kann ich später den Musikern im Studio meine musikalischen Ideen einfach vorspielen. Bei Streichern hilft das elektronisch erzeugte Muster mitunter auch bei Intonationsproblemen.

Spektrum: Digitaltechnik wird heutzutage oft beim Filmschnitt eingesetzt. Gibt es Schnittstellen zu Ihrer Arbeit als Komponist von Filmmusik?

Doldinger: Hier sind Computer sogar ein besonderer Segen. Früher saß ich mit dem verantwortlichen Cutter im Schneideraum und nahm mit der Uhr die Zeiten der einzelnen Szenen ab, um passend zu komponieren. Nur bei teuren Produktionen wurde im Studio der Filmausschnitt vorgeführt, während wir spielten. Heute bekomme ich als Grundlage ein Video mit einem Timecode. Im Studio wird es digitalisiert und auf eine Festplatte gespeichert. Das Synchronisieren von Komposition und Bild erfolgt nun direkt, sozusagen im Takt. Was früher oft dem Zufall überlassen war oder nur mit sehr vielen Klimmzügen gelang, läuft nun viel effizienter ab.

Spektrum: Der digitalen Musiktechnik wird gelegentlich unterstellt, sie fördere musikalischen Einheitsbrei, da auch weniger versierte PC- und Keyboard-Besitzer Brauchbares zustande bringen. Stimmen Sie dem zu?

Doldinger: Zwar besteht tatsächlich die Gefahr, dass jeder mit ein paar Tastengriffen leidlich brauchbare Klangflächen bauen kann. Aber in meiner Sparte zählen immer noch Qualität und der originelle Einfall. Ich sehe eher den positiven Effekt, dass die Digitaltechnik den Künstler gegenüber Studios und Auftraggebern emanzipiert. Denn wer sein Metier versteht, kann heute in den eigenen vier Wänden Filmmusik kreieren und bis zum Stadium des Masterings selbst produzieren. Das nenne ich künstlerische Freiheit.

Das Interview führte **Harald Fette**. Er studierte Soziologie und Politik und arbeitet als freier Journalist in Konstanz.

RESTAURIERUNG

Caruso lebt

Mit raffinierten Tricks und erheblichem Aufwand verhalfen Toningenieure den Aufnahmen des Startenors zu neuer Brillanz.

Von Bernd Müller

ULLSTEINBILD

Der Neapolitaner Enrico Caruso (1873–1921), ab 1904 in den USA ansässig, galt als bester Operntenor seiner Zeit. Sein Vortrag war technisch perfekt und gleichzeitig natürlich. Zudem war er ein talentierter Schauspieler.

Augen zu und Ohren auf: Rechts schrummen Kontrabässe, links flirren die Geigen, im Hintergrund klackern Kastagnetten, dann – »O sole mio«, Enrico Caruso, der wohl berühmteste Tenor aller Zeiten, erhebt seine Stimme in der Mitte. Diese Aufnahme ist ein Kuriosum, denn Orchester und Sänger sind einander nie begegnet. Das italienische Volkslied hat der Meister 1916 eingespielt, die Begleitung des Wiener Radio-Sinfonie-Orchesters stammt von 2001. Trotzdem klingt das Stück auf der CD »Caruso 2001« (erschienen bei BMG), als seien die Musiker gemeinsam im Studio erschienen.

Schon in den 1940er Jahren hatten Experten versucht, Carusos Aufnahmen auf Magnetbänder zu überspielen und das quäkende Orchester durch eine simultane Orchestereinspielung zu ersetzen. »Schauderhaft«, kommentiert Robert Pavlecka diesen missglückten Versuch. Als Toningenieur beim ORF in Wien zeichnete er für die Aufnahme der Caruso-CD mitverantwortlich. Mit moderner Studiotechnik und viel Fingerspitzengefühl hatte er den Gesang herauspräpariert. Über Kopfhörer verfolgten die Orchestermusiker im Studio die Stimme Carusos, der es mit den Vorgaben der Partitur nicht immer so genau nahm.

Um die mitunter fast hundert Jahre alte Patina aus Rauschen, Prasseln und Knacksen zu entfernen, setzte der Toningenieur Standard-PC-Software wie Samplitude oder Sound Laundry ein. Diese Programme digitalisieren analoge Aufnahmen und filtern das Rauschen in Echtzeit heraus – der Tontechniker hört also sofort das Ergebnis und kann Filterparameter gegebenenfalls variieren.

Alle Algorithmen zur digitalen Restauration oder Filterung von Musik und Sprache setzen eine Fourier-Transformation voraus: Jeder noch so komplexe Klang lässt sich auf eine Kombination reiner Sinusschwingungen zurückführen – das bewies 1822 der französische Mathematiker Jean-Baptiste Joseph Fourier. In der Praxis verwendet man die 1942 entwickelte Fast-Fourier-Transformation (FFT). Sie überführt das Schwingungsmuster in ein Frequenzspektrum. Scharfe Peaks zeigen an, bei welchen Frequenzen die Grund- und Obertöne eines Instrumentenklangs liegen. Durch Anheben oder Unterdrücken von Bereichen, sprich Filtern, lässt sich ein Klang somit variieren.

Damit der Toningenieur das Filterskalpell möglichst feinfühlig ansetzen kann, wird das Spektrum des hörbaren Frequenzbereichs bis 20 000 Hertz in möglichst viele schmale Bänder beziehungsweise Kanäle eingeteilt. Die besten Programme nutzen mehr als 2000 mit einer Breite von etwa 10 Hertz. Zum Vergleich: Der Mensch kann nur etwa 650 bis 800 Tonhöhenstufen unterscheiden.

Ein Tag Arbeit für drei Takte Musik

Um Knackser und Rauschen vom Original zu »subtrahieren«, benötigen die Algorithmen Fetzen eines reinen Störsignals. Am einfachsten ist das beim Rauschen. Die reine Variante ertönt in der halben Sekunde, wenn die Nadel des Plattenspielers aufsetzt; auch am Ende einer Platte gibt es jeweils ein paar Sekunden pures Rauschen. Eine weitere Möglichkeit: Der Toningenieur digitalisiert zwei Schallplatten mit derselben Aufnahme, das Nutzsignal ist zwangsläufig identisch, die Störgeräusche nicht, bei einer Subtraktion bleiben einzig diese übrig.

Sodann definierte Robert Pavlecka Schwellenwerte für die einzelnen Kanäle, die in der Nähe des jeweiligen Rauschpegels lagen. War ein Signal stärker, durfte es passieren, ansonsten wurde es unterdrückt. Welche Frequenzen wie stark beeinflusst werden sollten, gab der Toningenieur über eine mit der Maus gezeichnete Filterkurve vor. Selbst wenn in einzelnen Bändern Rauschanteile mitgenommen werden mussten, weil ausgerechnet darin ein wichtiger Grund- oder Oberton lagen, fiel das am Ende kaum auf, denn das Gesamtrauschen verschwand dennoch unter der Wahrnehmungsschwelle.

Eine weitere Herausforderung bei solchen Projekten sind Knackser, wie sie auf alten Schellackplatten häufig auftreten. Die Software spürt sie durch Analyse des Spektrums auf, denn ihr Impulscharakter verleiht Knacksern hohe Amplituden bis in obere Frequenzbereiche. Ist die Störung erkannt, wird sie entfernt und die Lücke gefüllt – je nach ihrer Dauer zum Beispiel mit Durchschnittswerten aus dem benachbarten Nutzsignal oder mit einem synthetischen Signal, das statistische Vorhersagemethoden berechnen.

Auch dazu gibt es eine überraschende Variante: Beim Abspielen einer Monoschallplatte mit einem Stereotonabnehmer treten Kratzgeräusche und Knackser im linken und rechten Kanal völlig unabhängig voneinander auf. Subtrahiert man die Signale aus der inneren und äußeren Rillenflanke, verschwindet deshalb das Mono-Signal der Musik, während die Störungen übrig bleiben. Vom Ausgangssignal abgezogen, bleibt dann das reine Nutzsignal.

Die Caruso-Restauration erwies sich allerdings als wesentlich komplizierter, denn dort sollten nicht nur Störgeräusche entfernt werden, sondern gleich das komplette Orchester. Die Software musste also so getrimmt werden, dass auch der Orchesterklang unter den Schwellenwert der Bandfilter geriet. Doch wenn Caruso gemeinsam mit dem Orchester erklang, drohte auch seine Stimme unterzugehen.

Hören Sie den Unterschied?

Die CD hat die Schallplatte verdrängt, und dank MP3 passen heute zehnmal mehr Songs als bei der Audio-CD auf eine Silberscheibe. Aber wird unser Ohr durch die Digitalisierung und Komprimierung der Musik nicht betrogen?

ZEFA

Eine zarte Melodie, gespielt von der ersten Violine, erfüllt den Konzertsaal. Das Orchester setzt ein, Pauken und Posaunen führen zum Finale. Wer nach einem solchen Konzerterlebnis nach mehr dürstet, kauft sich eine CD oder sucht – meistens noch illegal – entsprechende Titel im Internet. Doch er erhält stets nur eine Annäherung an das Original: Um die Datenfülle zu beherrschen, wurden Hörmodelle zu Rate gezogen und Informationen entfernt, die angeblich nicht zu hören sind.

So registriert das menschliche Ohr nur Frequenzen zwischen 16 und 20 000 Hertz, dementsprechend werden tiefere und höhere Frequenzen für die digitalen Formate nicht berücksichtigt. Das ist aber eine willkürliche Festlegung, weiß Birger Kollmeier, Professor für Medizinische Physik an der Universität Oldenburg. Der Grund für die untere Grenze ist die Hörschwelle: Um tiefere Töne wahrzunehmen, müssten sie so laut sein, dass sie schon das Gleichgewichtsorgan stören würden. Und für die weit jenseits von 20 000 Hertz fänden sich am Eingang der Hörschnecke keine Sensoren mehr, um den Schall in bioelektrische Impulse zu verwandeln.

Doch das ist nicht der Weisheit letzter Schluss. Zum Beispiel wurde in Experimenten beobachtet, dass höherfrequente Schallwellen im Innenohr quasi »gefühlt« werden können. Dazu kommen Nebeneffekte: Wenn zwei Töne jenseits von 20 000 Hertz miteinander interferieren, entstehen Differenztöne bei niedrigeren und damit hörbaren Frequenzen. Die fehlen dann auf der CD, denn bei der Digitalisierung werden Frequenzen über 22 500 Hertz unterdrückt.

Ein ähnliches Phänomen ist als »fehlender Grundton« bekannt. So spielt das Fagott seine Basstöne gar nicht, doch das menschliche Gehirn berechnet die Grundfrequenz und hat damit die Illusion eines Höreindrucks. Kollmeier erklärt: »Der nicht vorhandene Grundton ist das kleinste gemeinsame Vielfache der Periodenlängen aller hörbaren Tonkomponenten.«

Noch einen Schritt weiter als die CD gehen Komprimierungsverfahren wie MP3, die alles aus dem Signal entfernen, was laut Hörforschung nicht wahrgenommen wird. Zum Beispiel können laute Töne einer Frequenz leisere einer anderen Frequenz verdecken. Nicht hörbare Frequenzanteile werden bei MP3 nicht übertragen und durch Grundrauschen ersetzt.

»Im Allgemeinen funktioniert MP3 recht gut«, meint Birger Kollmeier, »es basiert aber auf Gehörmodellen, die zwanzig bis dreißig Jahre alt sind. Inzwischen gibt es neuere Erkenntnisse über die zeitliche Verarbeitung von Tönen.« So verdecken beispielsweise laute Signale auch die unmittelbar darauf gespielten leisen, was Komprimierungsverfahren noch nicht vollständig ausnutzen. Und beim glasklaren Klang von Kastagnetten werden auch die Grenzen von MP3 hörbar: Hier werden die Rauschanteile, die durch die Komprimierung entstehen, nicht gut genug versteckt.

Der Großteil der Bevölkerung nimmt vermutlich keinen Unterschied wahr. Gut trainierte Hörer und Menschen, die besser hören als andere, müssen jedoch auf weitere Verbesserungen warten. Dazu Kollmeier: »Die Kodierungsverfahren sind nur so gut wie die Gehörmodelle, die dahinter stecken – und auch hier gilt: Die Normierung ist der Forschung immer ein paar Schritte hinterher.«

Harald Fette

Robert Pavlecka musste deshalb mitunter Schwellenwerte von Hand einstellen.

So etwa bei der Phrase »O sole mio«. Während das Obertonspektrum des Vokals »o« bei tieferen Frequenzen liegt, verschiebt sich dieses Spektrum beim »e« und vor allem beim »i« nach oben. Pavlecka musste also beim »i« in »mio« erst die höheren Frequenzkanäle öffnen und dann beim »o« wieder herunterregeln. Als noch schwieriger erwiesen sich Konsonanten, die Zischlaute wie beim »s« enthalten oder einen starken Impuls am Anfang wie beim »t«. Kein Wunder, dass der Toningenieur des ORF für drei Takte mitunter einen Tag brauchte.

Nicht immer war das Ergebnis zufrieden stellend, gibt er zu. Auf der ein Jahr zuvor erschienenen CD »Caruso 2000« habe man die Stimme des Tenors »zerreinigt«: Mitunter beeindruckt zwar die Klangtiefe des Wiener Radio-Sinfonie-Orchesters, doch dazwischen schwebt eine körperlose, computerartige Stimme ohne Charakter. Bei der CD »Caruso 2001« duldeten die Techniker ab und zu ein leises Knacksen und Rauschen, dafür werden die Hörer mit einer viel natürlicheren Stimme belohnt. Dabei kam auch ein Kuriosum der Psychoakustik zu Hilfe. Testhörer empfinden dumpfe Klänge als brillanter, wenn ihnen etwas Rauschen beigemischt wird. Das Ohr erfindet offenbar im Rauschen Obertöne zur Musik, obwohl diese gar nicht vorhanden sind.

Nach der dritten CD, »Caruso 2002«, ist für Robert Pavlecka definitiv Schluss. »Das Material ist jetzt erschöpft«, befindet er. Nicht weil es keine Aufnahmen Carusos mehr gäbe, sondern weil auch der Jahrhunderttenor in manchen Einspielungen Schwächen offenbart. Trotzdem werde der Sänger seinem Ruhm gerecht, findet Pavlecka: »Die heutigen Startenöre hätte er locker an die Wand gesungen.« ◁

Bernd Müller ist Physiker und Wissenschaftsjournalist in Esslingen.

HI-FI-ANLAGE

Konzertsaal im Wohnzimmer

Flächenlautsprecher und Batterien kleiner Lautsprecherboxen erzeugen den perfekten Raumklang. Ein zentrales Element solcher Hi-Fi-Technik: digitale Signalprozessoren.

Von Tim Schröder

Noch vor wenigen Jahren dominierten möbelartige Lautsprecher das Wohnzimmer, wenn brillanter Klang gewünscht war. Doch den empfing der Hörer nur bei optimaler Platzierung zwischen den Boxen. Künftig sollen die hinter Schrankwänden und Deckenverkleidungen verschwinden und dabei fast im ganzen Zimmer einen räumlichen Klangeindruck vermitteln. Selbst klingende Werbe- und Projektionsflächen sind möglich. Stimme und Musik scheinen direkt dort zu entstehen, wo Sprecher oder Sänger zu sehen sind.

Siemens-Ingenieur Robert Bösnecker hat das System SieSonic entwickelt, eine Technik, mit der sich sogar Aluminium oder Plexiglas in flächige Lautsprecher verwandeln lassen. Dazu werden auf der Rückseite einer bis zu sieben Quadratmeter großen Fläche Breitbandvibratoren von der Größe kleiner Eishockey-Pucks aufgebracht. Wie ein ins Wasser geworfener Stein erzeugen solche elektromagnetischen Schwingspulen Biegewellen. Diese setzen sich über die Fläche fort und lassen die ganze Wand ertönen. Jeder Vibrator kann einen anderen Frequenzbereich bedienen.

Das Prinzip ist nicht neu. Bereits 1927 wurde ein Flächenlautsprecher im Hof des Deutschen Museums in München installiert – der so genannte Blatthaller. Das Ergebnis war passabel: Laut und vernehmlich hallten Musik und Worte den Besuchern entgegen. Erst mithilfe der Digitaltechnik lässt sich aber Hi-Fi realisieren. Das Problem: Die Wellen werden an den Rändern des Flächenlautsprechers reflektiert und überlagern sich den nachfolgenden; störende Interferenzen sind die Folge. Besonders unangenehm ist die »Resonanz«, bei der sich die Wellen gegenseitig verstärken.

Die Experten um Bösnecker eliminieren die störenden Frequenzen mit »Digitalen Signalprozessoren« (DSPs) – diese berechnen, wie die Schwingspulen angesteuert werden müssen. Da Resonanzfrequenzen von Material und Form des Flächenlautsprechers abhängen, vermessen die Wissenschaftler zunächst einen Prototyp im Labor. Mit Mikrofonen und Frequenzanalysatoren wird überprüft, bei welchen Frequenzen Resonanzen, Auslöschungen oder störende Überlagerungen auftreten. Mit diesen Messwerten werden die DSPs gefüttert. Frequenzen, die zu Resonanzen führen, können dann von vornherein gedämpft, andere verstärkt werden.

Gerade die aktive Veränderung des Klangbildes macht die Flächenlautsprecher besonders interessant. Zum Beispiel installierte Siemens vor kurzem ein Set von Flächenlautsprechern in der Wand- und Deckenverkleidung eines Konferenzraums im Münchner Flughafen. Der Klang des Systems lässt sich per Tastendruck auf verschiedene Standardsituationen einstellen. Zum Beispiel liegt bei einer Rede besondere Aufmerksamkeit auf dem mittleren Frequenzbereich zwischen zwei und vier Kilohertz, bei einer Präsentation im Kinostil sind hingegen tiefe Töne und Rundumklang wichtig.

Aus der Mitte des Raumes entspringt eine Quelle

Bösnecker kooperiert mit dem Möbel-Hersteller Brinkmann, der die Technik in Wohnzimmereinrichtungen einbaut. »Selbst Holz eignet sich als Flächenlautsprecher«, erklärt der Forscher, »aber das ist gar nicht so verwunderlich, wenn man bedenkt, dass Geigen ebenfalls daraus gemacht sind.« Der Werkstoff muss nur leicht sein, damit ihn die Spulen zum Schwingen anregen können. Zudem soll er aber auch steif sein, sonst können sich auf seiner Oberfläche keine kurzen Wellen fortsetzen. Eine Gummimatte etwa würde hohe Frequenzen einfach schlucken.

Qualität und Leistungsfähigkeit der Schwingspulen beeinflussen ebenfalls den Klang. Zu den Marktführern auf diesem Gebiet gehört das Kieler Unternehmen ELAC. ELAC hat eine Anrege-Einheit, einen so genannten Exciter, gebaut, der kompakt und doch schwer ist, über eine Schwingspule mit einem Durchmesser von 37 Millimetern verfügt und Leistungen von zwanzig bis dreißig Watt aufnehmen kann. Das reicht aus, um auch schwere Werkstoffe wie Plexiglas zum Beben zu bringen. Mit Excitern und einem speziellen Membranmaterial, das zugleich leicht und stabil ist, stellt das Kieler Unternehmen Flächenlautsprecher her, die sich flach wie Bilder an die Wand hängen lassen und mit verschiedenen Motiven bedruckt sind.

Obwohl die schwingenden Wände inzwischen Hi-Fi-Klang erreicht haben, sind immer noch Probleme zu lösen. So erklingen Flächenlautsprecher zwar bei Frequenzen zwischen 100 und 20 000 Hertz. Sehr tiefe Töne müssen aber über Subwoofer wiedergegeben werden. »Zudem erzeugen die Geräte aufgrund der einheitlichen Fläche noch ein etwas diffuses Klangbild«, räumt Bösnecker ein, »gerade Solo-Instrumente wie etwa Trompeten werden noch nicht absolut brillant wiedergegeben.« Forscher der Fraunhofer-Arbeitsgruppe für elektronische Medientechnologie (AEMT) in Ilmenau wollen dieses Problem mit einem gänzlich anderen Verfahren lösen: der Wellenfeldsynthese.

Dazu statten die Wissenschaftler Räume mit einer Vielzahl kleiner konventioneller Lautsprecher aus. Einer Hightech-Bordüre gleich werden bis zu 72 nebeneinander an den Wänden befestigt. Anders als ein einzelner Punktlautsprecher, der

SIEMENS

Im Münchner Siemens-Forum dienen Flächenlautsprecher auch als Projektionswände für Videos.

den Schall in einer Art Kugelwelle abgibt, erzeugen die vielen Einzellautsprecher zusammen ein breites Klangfeld, das den Raum gleichmäßig erfüllt.

Ein solches Wellenfeld vermag jedes beliebige Schallereignis nachzuahmen, die Lautsprecher müssen lediglich rechnergestützt aufeinander abgestimmt werden. Ein Beispiel: Von einer Punktquelle gehen – wie bei einem Steinwurf ins Wasser – kreisförmig Wellen aus. Auf eine Reihe von Lautsprechern übertragen bedeutet das, der mittlere Lautsprecher erklingt zuerst und am lautesten, die Lautsprecher zum Rande hin ertönen zeitverzögert und zunehmend leiser. So entsteht beim Zuhörer im Raum der Eindruck, von einer einzelnen Quelle beschallt zu werden. Dank des Computers lassen sich die Einzellautsprecher sogar so aufeinander abstimmen, dass in der Mitte des Raumes eine virtuelle Quelle entsteht – der Hörer kann so beispielsweise um einen Saxofonisten fast ganz herumgehen, der in Wirklichkeit von der CD kommt.

Zwar erzeugen moderne Dolby-Surround-Anlagen bereits einen erstaunlich echten Klang – allerdings nur dann, wenn man sich im optimalen Punkt des besten Hörens aufhält, dem Sweet Spot, vergleichbar der optimalen Stereo-Position. Dort ist aber in der Regel nur für wenige Hörer Platz – selbst im Großkino. Mit der Wellenfeldsynthese lässt sich dieser Punkt vergrößern.

Um Klänge zu speichern, verwenden die Fraunhofer-Forscher unter anderem den neuen MPEG-4-Standard. Anders als beim bekannten MP3-Format werden Musikdateien damit nicht nur komprimiert. Zusätzlich wird die räumliche Position eines jeden Tonsignals übertragen – etwa die Anordnung der Streicher im Orchester. Der Computer kann den Wellenfeld-Lautsprechern dann verschiedene Tonsignale zuordnen, um beispielsweise Instrumente zu gruppieren. Der Zuhörer im Raum gewinnt so den Eindruck eines wirklich dreidimensionalen Klanges, unabhängig davon, wo er gerade steht.

Noch gibt es keine kommerziellen Klangfeld-Produkte. In nächster Zeit sollen aber erste Anlagen im Profi-Bereich eingesetzt werden. In Großkinos könnte damit der Ort des idealen Hörens vergrößert werden. Das Zusammenwirken von Wellenfeldsynthese und MPEG-4 ist allerdings äußerst komplex. Bis erste Systeme für Privatkunden auf den Markt kommen, wird es wohl noch einige Jahre dauern. ◁

Tim Schröder hat Biologie und Physik studiert und war Redakteur im Wissenschaftsressort der Berliner Zeitung. Er lebt als freier Autor in Oldenburg.

PALÄONTOLOGIE

Der Aufbruch der frühen Menschen

Woher kommt der moderne Mensch, wie sahen unsere Urahnen aus, wie entwickelten sie sich weiter, und wie gestalteten sie ihr Alltagsleben? Eine Ausstellung in Mannheim gibt die Antworten.

Von Wilfried Rosendahl, Gaëlle Rosendahl, Hans-Peter Kraft und Alfried Wieczorek

Zahlreiche in den letzten Jahren gefundene Artefakte und Knochenreste haben ein neues Bild darüber entstehen lassen, wie sich der Mensch in der Altsteinzeit anschickte, Europa zu besiedeln und sich wechselnden Klimabedingungen und Landschaftsverhältnissen anzupassen. Die Ausstellung »MenschenZeit – Geschichten vom Aufbruch der frühen Menschen«, die gegenwärtig in den Reiss-Engelhorn-Museen in Mannheim zu sehen ist, widmet sich mit unkonventionellen Inszenierungen diesem wichtigen Teil der Menschheitsgeschichte.

In mehreren Erlebnisräumen können sich die Besucher auf eine spannende Zeitreise durch die Welt unserer steinzeitlichen Vorfahren begeben. Wenn, wie in dieser Ausstellung, mit allen Sinnen erfahrbare Geschichten vom Aufbruch der frühen Menschen erzählt werden, verwandeln sich die Exponate gewissermaßen zu lebendigen Hauptdarstellern.

Unsere Kenntnis von der Frühgeschichte des Menschen in Europa hat vor rund hundert Jahren eine spektakuläre Erweiterung erfahren: In einer Sandgrube nahe der Ortschaft Mauer bei Heidelberg wurde im Oktober 1907 der Unterkiefer eines Urmenschen entdeckt. Otto Schoetensack, der an der Universität Heidelberg Urgeschichte lehrte und die Arbeiten an der Sandgrube jahrelang wissenschaftlich begleitete, beschrieb diesen Menschentyp als *Homo heidelbergensis*. Bis heute repräsentiert dieser Fund mit einem Alter von rund 700 000 Jahren den ältesten Mitteleuropäer.

Eine nach neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen durch das Atelier Wildlife Art in Breitenau erstellte Büstenrekonstruktion vermittelt dem Ausstellungsbesucher, wie der Urmensch von Mauer ausgesehen haben könnte. Aus gutem Grund wird die Büste des *Homo heidelbergensis* ohne Körperfarben und -behaarung präsentiert. Denn diese Elemente sind aus Knochenfunden nicht zu erschließen und wären deshalb reine Spekulation und künstlerische Freiheit. Die Rekonstruktion der Weichteile hingegen ist recht gut möglich, denn die Ansatzstellen von Muskulatur und Gewebe lassen sich auf den Knochen erkennen. Daraus können auch Rückschlüsse auf die Stärke der Muskeln gezogen werden. Wer möchte, kann am Computer der Büste Augen- und Hautfarbe sowie Körperbehaarung hinzufügen und sich ein eigenes Bild vom Urmenschen von Mauer machen.

Über einen als Höhle gestalteten Erlebnisraum tauchen die Besucher in einen anderen Abschnitt der Menschheitsgeschichte ein: in die Welt der Neandertaler. Die Höhle ist eine Nachbildung eines der bedeutendsten urgeschichtlichen Höhlenfundorte der Welt, des »Hohle Fels« bei Schelklingen auf der Schwäbischen Alb. Die realistische Höhlenatmosphäre entsteht jedoch nicht nur durch den optischen Eindruck, der durch Abformungen des Originals erzeugt wird, sondern auch durch Einbeziehen der Gehör- und Geruchssinne. Tropfgeräusche und Halleffekte sowie ein speziell entwickelter Erdgeruch lassen die wirkliche Höhlenwelt perfekt nachempfinden. In die Höhlenwände und -gänge eingearbeitete Bereiche präsentieren anhand von Fundstücken und Rekonstruktionen lebensnahe Geschichten aus dem Alltagsleben der damaligen Jäger und Sammler: Wie wohnten die Wildbeuter, wie kleideten und ernährten sie sich, wie nutzten sie das Feuer, über welche Technologien verfügten sie, wie lebten sie zusammen, und wie gingen sie mit dem Tod von Mitmenschen um?

Am Ausgang der Höhle nimmt der Zeitreisende an einem Familientreffen der besonderen Art teil. An einem Spätsommer-Nachmittag vor etwa 30 000 Jahren begegnen sich unter einem Felsdach eine Neandertalerfamilie und eine Familie des modernen Menschen. Während zwei Erwachsene an einer Feuerstelle das Abendessen vorbereiten, spielen ein Neanderta-

WISSENSCHAFTLICHE REKONSTRUKTION: WILDLIFE ART; KLEIDUNG: RUDOLF WALTER

Lebten Neandertaler und moderne Menschen so friedlich zusammen wie in dieser Szenerie? (Vergleiche auch Detailbild auf S. 39.)

lerjunge und ein anatomisch modernes Mädchen mit einer Maus. Am Rande des Felsdaches hat eine Frau neue Klingen angefertigt, und aus dem Talgrund kehrt ein Neandertalermann mit einem erlegten Hasen von der Jagd zurück.

Diese Szenerie verbildlicht die aktuellen Fragen und Diskussionen um das Verschwinden der Neandertaler. Während noch Mitte der 1980er Jahre die Meinung vorherrschte, die »dummen« Neandertaler seien durch den »intelligenten« modernen Menschen ausgerottet worden, sind sich die Wissenschaftler heute einig, dass eine solche Ansicht völlig falsch ist. Funde belegen nämlich, dass Neandertaler und moderne Menschen mehrere tausend Jahre lang gemeinsam in Europa lebten. Sind die Neandertaler also aus weniger spektakulären Gründen ausgestorben, wie etwa durch eine erhöhte Kindersterblichkeit? Oder haben sie sich vielleicht mit den modernen Menschen vermischt und sind dadurch nach und nach in dessen Erbmaterial aufgegangen? Leben Neandertaler in gewisser Weise noch in unseren Genen fort (siehe »Der Ursprung lag in Afrika« auf S. 38)?

Im Jahr 1998 gelang die erste Analyse von Neandertaler-DNA. Das Erbmolekül hatte zuvor aus Knochenresten gewonnen werden können. Den Ergebnissen zufolge hatten sich die beiden Menschenformen nicht vermischt. Der letzte gemeinsame Vorfahre von Neandertaler und modernem Menschen sollte demnach vor rund 600 000 Jahren gelebt haben. Mittlerweile wissen die Forscher aber, dass die bisherigen Analysen nicht ausreichen, um eine solche Aussage zu treffen.

MENSCHENZEIT

▶ Die Ausstellung **»MenschenZeit: Geschichten vom Aufbruch der frühen Menschen«** ist bis 18. Mai in den Reiss-Engelhorn-Museen, D5, 68159 Mannheim, zu sehen; geöffnet täglich 11–18 Uhr, montags geschlossen. Der gleichnamige Ausstellungsführer, herausgegeben von A. Wieczorek und W. Rosendahl, ist im Verlag Philipp von Zabern erschienen und als Museumsausgabe für 11,80 € oder über den Buchhandel (ISBN 3-8053-3132-0) für 15,80 € erhältlich. Informationen über das Begleitprogramm sind unter (0621) 2933151 oder unter www.reiss-engelhorn-museen.de erhältlich.

ALLE BILDER DIESES BEITRAGS: J. CHRISTEN, REISS-ENGELHORN-MUSEEN MANNHEIM

Solche Zelthütten aus Holzstangen und Pferdefellen boten den Menschen gegen Ende der letzten Eiszeit Schutz vor der Witterung.

Ebenfalls 1998 wurde unter einem Felsdach im Lagar-Velho-Tal in Portugal das 24 500 Jahre alte Skelett eines Kindes entdeckt. Nach Ansicht einiger Wissenschaftler weisen anatomische Merkmale auf einen Mischling aus modernem Menschen und Neandertaler hin. Viele Forscher lehnen diese Interpretation jedoch ab. Die Diskussion um das Verschwinden der Neandertaler ist also noch immer offen.

Überleben am Ende der Eiszeit

Im Zusammenhang mit der Ankunft des modernen Menschen steht auch ein Seitengang der Höhle, in dem Musik und Kunst der Eiszeit lebendig werden. Knochen- und Geweihschnitzereien aus französischen Fundstellen zeugen von einer großen Kunstfertigkeit des damaligen Menschen. In einer außergewöhnlichen Lebendigkeit zeigen Figuren, Gravuren und Reliefs die bevorzugten Jagdtiere wie Wildziegen, Bisons, Rentiere und Wildpferde (Bild Seite 90 oben).

Eine von kalten Winden durchzogene, vegetationsarme Sand- und Kieslandschaft stellt den Lebensraum der Mammutjäger nach. Neben Wolf, Schnee-Eule, Wildpferd, Rentier und Vielfraß begegnen die Besucher hier auch einem Schädelabguss des größten Mammuts der Welt aus der letzten Eiszeit, gefunden in Siegsdorf bei Traunstein.

Wie zwei außergewöhnliche Holzfunde aus Mannheimer Kiesgruben belegen, verfügten die Menschen jener Zeit nicht nur über Geräte aus Stein und Knochen. Die Holzstücke weisen eindeutige Bearbeitungsspuren durch den Menschen auf. Solche Funde aus der jüngeren Altsteinzeit sind äußerst selten.

Vor etwa 12 500 Jahren – kurz vor Ende der letzten Eiszeit – zogen jeden Sommer und jeden Winter Pferdeherden durch das Rheintal. Gruppen von Jägern hielten sich deshalb gerade zu diesen Jahreszeiten dort auf. Ihre Zelthütten bestanden aus einem Holzstangengestell, über das Pferdefelle gelegt wurden. Der Boden im Innenraum war mit Schieferplatten gepflastert. Eine Feuerstelle diente der Zubereitung von Nahrung und als Wärmespender (Bild oben). Reste von solchen Behausungen konnten in Gönnersdorf bei Koblenz ausgegraben werden; der Ausbruch eines Eifel-Vulkans hatte die Siedlungsspuren mit Bims überdeckt und dadurch für die neuzeitlichen Archäologen konserviert.

Die nächsten Schritte in der Ausstellung »MenschenZeit« führen in einen Birkenwald. Die Klimaerwärmung am Ende der letzten Eiszeit hatte diesen Landschaftswandel möglich gemacht. Die Jagd mit Pfeil und Bogen war verbreitet, und der Fischfang spielte eine nicht unerhebliche Rolle. Wie sich die damaligen Fischer als Insassen eines Einbaums fühlen mochten, kann selbst ausprobiert werden.

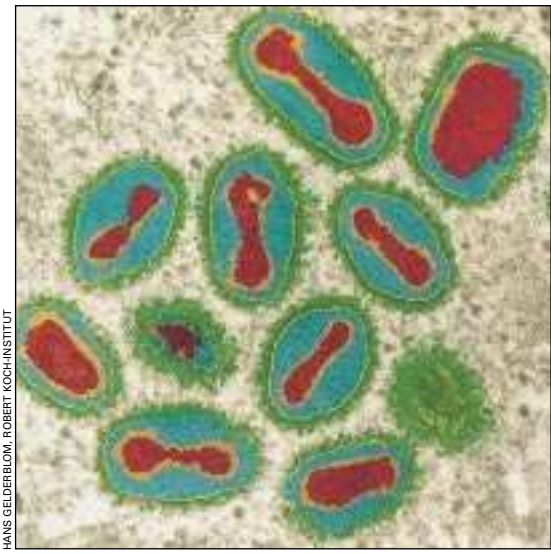
Der Übergang von den Jägern und Sammlern zu den Bauern und Hirten verlief fließend. Einerseits wurde hier und da schon in der Mittelsteinzeit auf kleinen Flächen Getreide angebaut, andererseits gab es auch zu Beginn der Jungsteinzeit noch Menschengruppen, die als Wildbeuter lebten. In der Ausstellung spiegelt sich dieser Übergang visuell und akustisch in der Rauminszenierung wider. Fast unmerklich wird der Zeitraum 7500 Jahre ▷

▷ vor heute betreten. Schnell fällt der Blick auf einen Mann, der von einer zwei Keramiktöpfe tragenden Ziege begleitet wird. Vorbei an einem verlandeten Flusslauf mit quakenden Fröschen führen sie ihre Schritte über einen Pfad durch ein Kornfeld auf ein Dorf zu. Die Geräusche eines geschäftigen Treibens von Menschen und Tieren klingen herüber. Der Mann kommt aus dem Südwesten und ist ein Händler der La-Hoguett-Leute. Diese waren Bauern, ebenso wie die Bandkeramiker aus dem Dorf, jedoch stellten sie ihre Keramik in einer anderen Technik her. Zum Zweck von Tausch und Handel kam es in der Oberrheinebene immer wieder zum Kontakt zwischen beiden Gruppen. Zahlreiche Werkzeug- und Keramikfunde aus der Umgebung von Mannheim sind Zeugnisse aus dem Alltag der ersten Bauern und Hirten, für deren Ernährung Jagen und Sammeln noch wichtig waren.

Auch für die Menschen der Jungsteinzeit war Feuerstein ein unentbehrlicher Rohstoff. Da dieser jedoch nur in bestimmten Regionen in gewünschter Qualität, Farbe und Eigenschaft vorkommt, entstanden an solchen Orten regelrechte Feuersteinbergwerke. Je nach Geländeform und Beschaffenheit des Untergrundes sowie der Lage des Feuersteinvorkommens gab es unterschiedliche Bergwerkstypen. Wie vor etwa 5000 Jahren der Feuersteinabbau erfolgte, ist Inhalt der letzten Geschichte vom Aufbruch der frühen Menschen. Am Hang eines Hügels war im Tagebau eine Terrassenfläche ausgegraben worden. Von dieser aus trieben die Bergleute anschließend mit Geweihhacken und Geröllschlägeln etwa ein Meter hohe Gänge – so genannte Weitungen – zwei bis drei Meter tief in den Berg. Der Abbau der Feuersteinlagen und -knollen erfolgte beim Gangvortrieb. Zur Stabilität ließ man zwischen einzelnen Weitungen Felsstützpfeiler stehen, teilweise waren sie durch Quergänge miteinander verbunden. Der in der Ausstellung gezeigte Abbau nimmt Bezug auf den Fundort Pleigne »Neumühlefeld III/ Löwenburg« im Schweizer Kanton Jura.

Einhergehend mit den Bergwerksstandorten entwickelte sich quer durch Europa ein Handelsnetzwerk, in dem neben Feuerstein auch andere Waren wie Schmuck und Keramik gehandelt wurden – bis schließlich mit den Metallen Gold, Kupfer und Bronze gänzlich andere Werkstoffe auftauchten, die für eine neue Wende in der Kulturentwicklung sorgten. ◁

Wilfried Rosendahl ist Quartärforscher am Institut für Angewandte Geowissenschaften in Darmstadt. Die Urgeschichtlerin **Gaëlle Rosendahl** und der Archäologe **Hans-Peter Kraft** arbeiten an den von Prof. **Alfried Wieczorek** geleiteten Reiss-Engelhorn-Museen in Mannheim.



HANS GELDERBLOM, ROBERT KOCH-INSTITUT

BIOTERRORISMUS

Vorbereitung mit Vernunft

Wie andere Staaten auch, wappnet sich Deutschland gegen bioterroristische Anschläge. An den Vorsorgemaßnahmen ist das Robert Koch-Institut in Berlin maßgeblich beteiligt.

Von Reinhard Kurth

Vor gut zwanzig Jahren atmete die Welt erleichtert auf: Die Pockenkrankheit war besiegt. Über viele Jahrhunderte hatten Pockenviren weltweit Epidemien mit hoher Sterblichkeitsrate verursacht. Die letzte Erkrankung »im Feld« hatte es 1977 in Somalia gegeben; der letzte Pockenfall in Deutschland war 1972 zu verzeichnen gewesen. In der Bundesrepublik wurde die Impfpflicht gegen Pocken 1976 aufgehoben, vier Jahre später auch in der damaligen DDR. Restbestände an Pockenviren befinden sich offiziell nur noch in zwei Hochsicherheitslaboratorien in den USA und in Russland, wo sie zu Forschungszwecken verwahrt werden.

Inzwischen lässt sich jedoch nicht mehr völlig ausschließen, dass es auch außerhalb dieser beiden offiziellen Lagerstätten Pockenviren gibt. Die Wahrscheinlichkeit einer bewussten Freisetzung ist zwar äußerst gering, aber sie ist nicht null. Ein solcher bioterroristischer Akt wäre aus seuchenhygienischer Sicht der größte anzunehmende Unfall: Die Pockenerreger sind – überwiegend durch Tröpfcheninfektion – auf andere Menschen übertragbar, es gibt nach wie vor keine Therapie, und in der Vergangenheit starben etwa ein Drittel der Infizierten. Deshalb hat die Vorbereitung auf einen solchen Fall trotz seiner geringen Eintrittswahrscheinlichkeit einen überaus hohen Stellenwert.

Um Vorsorge gegen bioterroristische Anschläge zu treffen, sie gegebenenfalls rasch zu erkennen und geeignet reagieren zu können, ist eine koordinierte Zusammenarbeit der Bundes- und Landesbehörden im Bereich Gesundheit, Katastrophen- und Zivilschutz sowie der Forschungsinstitute erforderlich. Hierbei kommt dem Robert Koch-Institut in Berlin als zentrale Forschungseinrichtung des Bundesministeriums für Gesundheit und Soziale Sicherung (BMGS) auf dem Gebiet der Infektionskrankheiten eine zentrale Rolle zu: Ein Zentrum für Biologische Sicherheit entwickelt Verfahren zur schnellen Diagnostik hochpathogener Viren, Bakterien, Pilze und Toxine. Des Weiteren wirkt das Zentrum als zentrale Informationsstelle, um Öffentlichkeit und Fachöffentlichkeit auf dem Gebiet der Bioterrorismus-Abwehr zu informieren sowie Konzepte zu initiieren und wenn nötig zu koordinieren.

So wurden gemeinsam mit BMGS, Bundesländern und Fachkreisen Szenarien diskutiert und ein Rahmenkonzept für Pockenschutzimpfungen entwickelt. Die vorgeschlagene Impfstrategie orientiert sich an einem Phasenmodell, das Risiko und Nutzen der Impfung berücksichtigt:

- Phase 1: kein einziger Pockenfall weltweit, also der heutige Zustand,
- Phase 2: ein erster Pockenfall weltweit,
- Phase 3: ein erster Pockenfall in Deutschland.

Diese Pockenviren (in einer kolorierten elektronenmikroskopischen Aufnahme) stammen aus der letzten in Deutschland aufgetretenen Infektion.

In der ersten Phase, die der aktuellen Situation entspricht, müssen insbesondere die Bundesländer logistische und organisatorische Vorbereitungen für die beiden anderen Phasen treffen. Es wird darüber diskutiert, ob bereits in Phase 1 das Personal der fünf besonderen Behandlungszentren in Berlin, Hamburg, Leipzig, Frankfurt und München geimpft werden sollte. Diese Zentren wurden vor einigen Jahren für die Behandlung hochansteckender Erkrankungen wie Lassa- oder Gelbfieber eingerichtet und würden im Falle eines Pockenausbruchs besonders beansprucht.

Impfung in kürzester Zeit

Deutschland ist in der glücklichen Lage, bereits jetzt über mehr als fünfzig Millionen Dosen Impfstoff zu verfügen, was für großflächige Abriegelungsimpfungen reichen würde. So könnte man versuchen, die Ausbreitung des Erregers zu verhindern. Bis Ende 2003 wird dieser Vorrat auf hundert Millionen Dosen aufgestockt, um im Notfall jeden Einwohner impfen zu können. Durch die Initiative des BMGS waren die ersten Impfdosen bereits im Herbst 2001 beschafft worden. Allerdings hat die Vakzine derzeit keine Zulassung (es gibt im Moment weltweit keinen einzigen zugelassenen Pockenimpfstoff). Der Impfstoff enthält ein mit dem Pockenvirus verwandtes, abgeschwächtes Virus, das so genannte Vaccinia-Virus. Es handelt sich hierbei um den Lister-Elstree-Stamm – die Vakzine, die ihre Wirksamkeit bereits bei der Ausrottung der Pocken belegt hat.

Allerdings stehen der Wirksamkeit des Pockenimpfstoffs unerwünschte Nebenwirkungen gegenüber, deren Rate im Vergleich zu den anderen gegenwärtig empfohlenen Impfungen beträchtlich ist. Pro einer Million Impflingen muss man mit tausend behandlungsbedürftigen Erkrankungen rechnen, etwa dreißig Dauerschäden und ein bis zwei Todesfällen. Diese Nebenwirkungen sind nur dann vertretbar, wenn tatsächlich die Gefahr einer Pockeninfektion besteht. Ob die US-Regierung die Schutzimpfung wirklich wie angekündigt im Jahre 2004 der breiten Bevölkerung anbieten wird, bleibt abzuwarten.

In Phase 2 müssten medizinisches Personal und ausgewählte Berufsgruppen, ▷

Spektrum der Wissenschaft
Zum Erfolg mit Online@dressen

➤ Aetherforschung
Neue Impulse für die Naturwissenschaften, und die Mathematik
www.aether-research.de

➤ Dipl.-Ing. Runald Meyer VDI
Entwicklung, Konstruktion
Technische Berechnung
Strömungsmechanik
www.etastern.de

➤ Forschungszentrum Jülich
Brennstoffzellen
Technologie, Jobs, Dissertationen, Diplomarbeiten
www.fuelcells.de/jobs

➤ Forum MedizinTechnik und Pharma in Bayern e.V.
Innovationen für die Medizin
www.forum-medtech-pharma.de

➤ PARA BioScience GmbH – We Are Immunology –
Immunologische Testungen, in vivo-in vitro. Präklinik. Antikörper auch durch Gensequenz
www.para-bioscience.com

➤ Prof. (apl.) Dr. Dr. habil. Harald Reiss
Controlling/upgrade F+E-Antrag/Projekt Patent-Einspruchsmaterialie, Simulations
www.haraldreiss.de

➤ Spektrum Akademischer Verlag
www.spektrum-verlag.com

➤ Sterne und Weltraum Verlag
www.suw-online.de

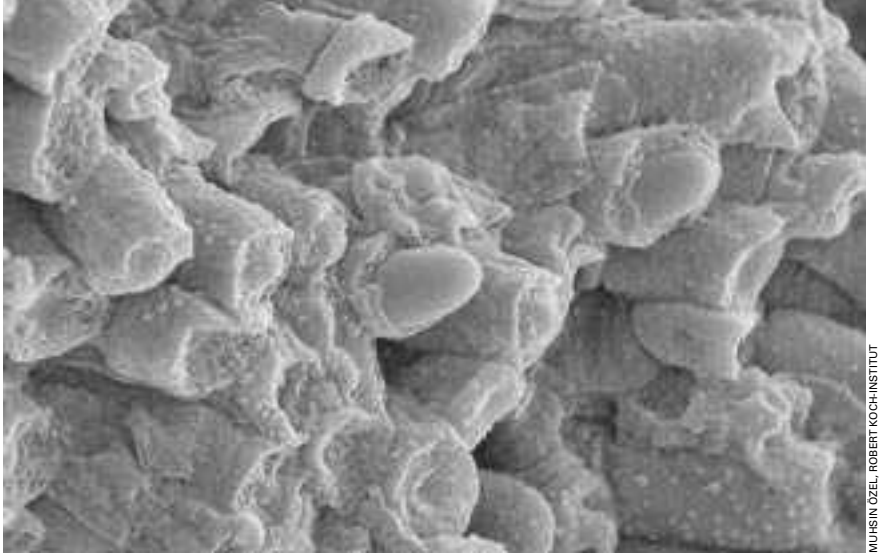
➤ Wissenschaft Online GmbH
Wir machen Wissenschaft transparent!
www.wissenschaft-online.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 80,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag bestehend aus einer Branchenzeile, Firmenname und WWW-Adresse. Zusätzlich erscheint Ihre Anzeige als Link-Eintrag auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft.

Informationen erhalten Sie direkt von
GWP media-marketing
Anzeigenverkauf Spektrum der Wissenschaft • Mareike Grigo
Telefon (02 11) 887-23 94 • Telefax (02 11) 887-23 99
E-Mail: m.grigo@vhb.de

Mit der Veröffentlichung Ihrer WWW-Adresse im Heft und im Internetangebot von Spektrum der Wissenschaft erreichen Sie eine gehobene Zielgruppe und gewinnen für Ihre Online-Kommunikation hohe Aufmerksamkeitswerte.

www.spektrum.de
Ihre Anlaufstelle für Wissenschaft im Internet



MUHSIN ÖZEL, ROBERT KOCH-INSTITUT

Diese elektronenmikroskopische Aufnahme des Milzbrand-Erregers *Bacillus anthracis* zeigt in einigen Bakterien ovale Sporen, die bei Stress (zum Beispiel Nährstoffmangel) als Dauerform gebildet werden.

▷ die zur Aufrechterhaltung des öffentlichen Lebens erforderlich sind, geimpft werden. In Phase 3 stünden umfangreiche Abriegelungsimpfungen oder sogar Massenimpfungen an. Eine Pflichtimpfung wäre auf der Grundlage des Infektionsschutzgesetzes (§ 20, Abs. 6 oder 7) denkbar.

Wichtig ist, dass die Vorbereitungen in Phase 1 so rasch wie möglich abgeschlossen und die Voraussetzungen geschaffen werden, die Impfungen in Phase 2 und 3 innerhalb kürzester Zeit durchführen zu können. Denn eine Impfung kann noch wirksamen Schutz bieten, wenn sie innerhalb von vier Tagen nach Pockenexposition durchgeführt wird. Zudem wäre auf Grund der zu erwartenden Unruhe in der Bevölkerung ein rasches Handeln erforderlich. Bisherige Erfahrungen mit Massenimpfungen zeigen, dass in einer gut organisierten Impfstätte etwa 5000 Personen pro Tag geimpft werden können. Für die Bundesrepublik Deutschland sind deshalb mehr als 3000 Impfstätten einzuplanen.

Der rechtzeitigen Erkennung eines bioterroristischen Angriffs kommt besondere Bedeutung zu. Betroffene müssen möglichst rasch zielgerichtet medizinisch versorgt werden. Außerdem gilt es, die weitere Verbreitung des Erregers oder Toxins möglichst schnell zu unterbinden oder weitestmöglich einzuschränken. Hinzu kommt in solchen Fällen, dass Entscheidungsträger und Öffentlichkeit frühzeitig informiert werden müssen, um geeignete Maßnahmen zu ergreifen beziehungsweise Panik zu vermeiden. Deshalb arbeitet die Forschung mit Hochdruck an der Weiterentwicklung der schnellen und sicheren Diagnostik der relevanten Erreger.

Ein Problem hierbei: Im klinischen Bild lassen sich Menschenpocken nicht von den weniger gefährlichen Affenpocken unterscheiden, die gelegentlich noch in Zentralafrika auftreten. Auch bei Windpocken, die durch das zu den Herpes-Viren zählende Varizella-Zoster-Virus verursacht werden, entstehen Bläschen auf der Haut. Unerfahrene Ärzte könnten hierbei an Pocken denken. Zwar zeigen Pockenbläschen – im Gegensatz zu den Windpocken – alle den gleichen Entwicklungsstand und verteilen sich im Gesicht und an den oberen Gliedmaßen von innen nach außen. Doch nur eine schnelle und zuverlässige Labordiagnostik würde bei Verdacht auf einen bioterroristischen Hintergrund die rasch notwendige Information liefern.

Rascher Nachweis des Erregers ist entscheidend

Mit der Diagnostik von Pockenviren hat sich eine wissenschaftliche Arbeitsgruppe befasst. Diese Gruppe hat einige Laboratorien vorgeschlagen, darunter das Robert Koch-Institut, die eine diagnostische Orientierungsuntersuchung auf Pocken unter den notwendigen Sicherheitsvorkehrungen (der so genannten Schutzstufe 3) durchführen können. Im Falle eines Verdachts würde in einem ersten Schritt Probenmaterial – entweder einem Patienten oder der Umwelt entnommen – inaktiviert und fixiert. Die nachfolgende elektronenmikroskopische Untersuchung würde klären, ob überhaupt Viren der Orthopockenvirusgruppe vorliegen. Zu den Orthopocken zählen neben den Menschenpocken (Variola) auch Affen-, Kuh- oder Kamelpocken, aber auch Vaccinia, sodass im Elektronenmikroskop nicht zwischen Impfvirus und Pockenerreger unterschieden werden könnte.

Für eine weitere Differenzierung eignet sich die Polymerasekettenreaktion (PCR). Mit diesem Verfahren lassen sich geringste Mengen des Erbmoleküls DNA rasch vervielfältigen, sodass ein schneller erregerspezifischer Nachweis möglich ist. Dazu wird die Probe mit einem speziellen salzhaltigen Puffer behandelt, der umhüllte Viren und Zellen sofort inaktiviert und die DNA freisetzt. Mit spezifischen Nachweissystemen lassen sich unterschiedliche Gene der Orthopockenviren als Zielsequenzen verwenden. Damit kann zum Beispiel das Variola-Virus von den anderen Orthopockenviren unterschieden werden. Die Aufreinigung der DNA und die PCR nehmen etwa acht Stunden in Anspruch. Zur Qualitätssicherung organisiert das Robert Koch-Institut Ringversuche.

Der Nachweis von Variola-Viren in Patientenproben würde die klinische Diagnose Pocken bestätigen. Gäbe es bei anderen Proben – zum Beispiel in einem Labor gefundene verdächtige Substanzen – nach einer positiven PCR einen begründeten Verdacht auf Variola-Viren, so müsste deren Vorhandensein anhand ihrer Vermehrungsfähigkeit nachgewiesen werden. Dies geschähe durch Anzucht in Zellkultur und nachfolgende PCR einschließlich Sequenzierung und Stammbaumanalyse. Die Anzucht von Pockenviren muss aus nichtinaktivierten Materialien erfolgen und ist nur in Laboratorien der höchsten Sicherheitsstufe 4 möglich. Zurzeit gibt es in Deutschland nur zwei Labors dieser Sicherheitsstufe: eines in Hamburg und eines in Marburg. Ein weiteres im Robert Koch-Institut in Berlin ist in Planung.

Die finanziellen Mittel, welche die USA für die Bioterrorismus-Abwehr bereitgestellt haben, übertreffen bei weitem die entsprechenden Mittel der europäischen Länder. Auch in der Bundesrepublik sollten ausreichend dotierte und evaluierte Forschungsprogramme auf diesem Gebiet etabliert werden, um Anschluss an internationale Entwicklungen zu halten, zum Beispiel auf dem Gebiet neuartiger Impfstoffe oder der Biowaffen-Detektoren.

Außer dem Variola-Virus gibt es noch eine Reihe anderer Erreger, mit denen bei einem bioterroristischen Anschlag zu rechnen wäre. Nach einer Einteilung der amerikanischen Infektionsschutzbehörde *Centers for Disease Control and Prevention* in Atlanta sind dies biologische Agenzien der Kategorie A. Dazu zählen solche Erreger und biologische Giftstoffe, die sich leicht ausbringen lassen oder leicht von Mensch zu Mensch übertragen werden und die wegen ihrer hohen Morbidität und Letalität

schwer wiegende Auswirkungen auf die öffentliche Gesundheit haben können: Neben dem Variola-Virus sind dies *Bacillus anthracis* (Milzbrand), *Yersinia pestis* (Pest), *Francisella tularensis* (Tularämie) und Botulinustoxin. Das Robert Koch-Institut führt nicht nur an diesen Erregern und Toxinen der Kategorie A diagnostische Arbeiten durch, sondern auch an weiteren, die von der Weltgesundheitsorganisation als besonders geeignet für bioterroristische Anschläge angesehen werden. Zu diesem »dreckigen Dutzend« zählen zum Beispiel die Erreger von Brucellose und Q-Fieber oder die Toxine Rizin und Enterotoxin B.

Optimismus ist kein Ersatz

Ein erstes sichtbares Zeichen für einen bioterroristischen Anschlag kann das gehäufte Auftreten ungewöhnlicher oder gleichartiger Symptome sein. Das Zentrum für Infektionsepidemiologie des Robert Koch-Instituts koordiniert bundesweit das Meldewesen nach dem Infektionsschutzgesetz und führt die zentrale Datenbank der meldepflichtigen Infektionskrankheiten. Die Online-Vernetzung mit den Landesgesundheitsbehörden und den 430 Gesundheitsämtern der Bundesrepublik Deutschland und eine tägliche 24-Stunden-Rufbereitschaft ermöglichen, im Seuchen- oder Verdachtsfall entsprechend schnell zu reagieren. Zum Beispiel stehen Teams von Epidemiologen bereit, die auf Anfrage der Bundesländer vor Ort bei der Aufklärung helfen können. Das Robert Koch-Institut ist auch Ansprechpartner für Deutschland im Frühwarnsystem der Europäischen Union und wirkt in den europäischen Programmen zur Überwachung spezieller Infektionskrankheiten mit.

Das Robert Koch-Institut stellt in erster Linie Expertenwissen zur Verfügung und kann darüber hinaus im Rahmen seiner Aufgaben im Bund-Länder-Informationsverfahren nach dem Infektionsschutzgesetz koordinierende Aufgaben übernehmen. Die Handlungskompetenz liegt nach dem Grundgesetz bei den Ländern und Kommunen, beim Bund nur im Falle einer äußeren Bedrohung. Die in Zukunft möglicherweise auf Deutschland zukommenden Probleme können daher nur gemeinsam gelöst werden. Aber auch wenn die Hoffnung groß ist, dass die Pocken ausgerottet bleiben, gilt: Optimismus ist kein Ersatz für die nötige Vorbereitung. ◁

Prof. **Reinhard Kurth** ist Präsident des Robert Koch-Instituts in Berlin.

MATHEMATIK

Känguru der Mathematik

Ein Wettbewerb für Schüler hat in kurzer Zeit überraschend großen Zulauf gewonnen.

Von Christoph Pöppe

Die Idee ist älter als der TIMSS- und der PISA-Schock; sie ist nicht besonders spektakulär, und doch erreicht sie mit verblüffend einfachen Mitteln etwas vom (angeblich) Schwierigsten: Schülern Spaß an der Mathematik zu vermitteln.

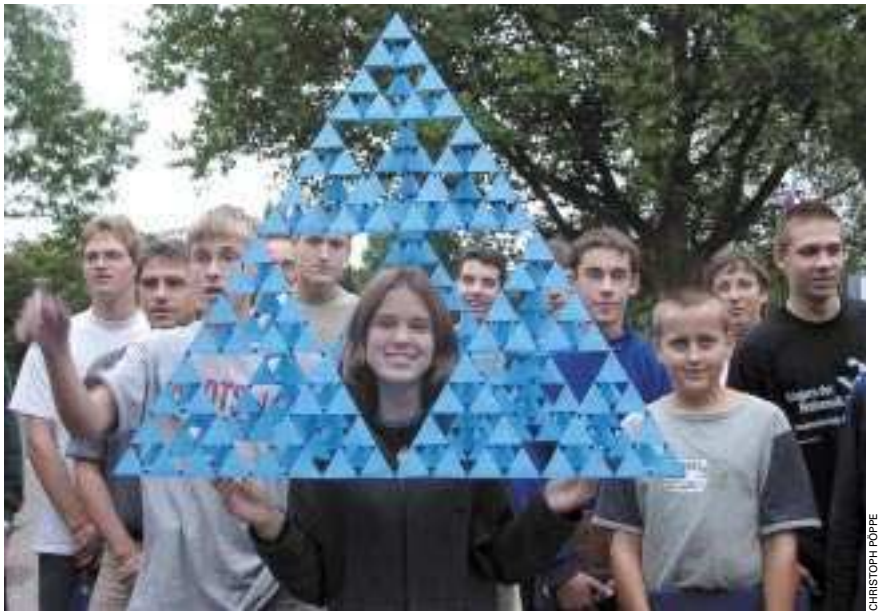
Sie heißt »Känguru«, weil sie aus Australien stammt; sonst hat der Name nichts zu bedeuten. Die dort 1978 erstmals ausgetragene »Australian Mathematics Competition« gewann rasant an Attraktivität. Zwei begeisterte französische Mathematiklehrer importierten 1991 die Idee in ihr Heimatland, wo sie ebenfalls großen Anklang fand. Inzwischen ist sie über ganz Europa verbreitet: Zeitgleich am dritten Donnerstag im März brüten Schüler und Schülerinnen von der 3. bis zur 13. Klasse über einer Fragenliste, die auf das jeweilige Alter abgestimmt, aber bis auf kleine Konzessionen an die nationalen Lehrpläne europaweit einheitlich ist.

Von den 2,5 Millionen europäischen Teilnehmern des letzten Jahres kommen 440 000 aus dem Pionierland Frankreich. Aber Deutschland holt auf: Was 1995 an drei Berliner Schulen mit 187 Teilnehmern begann, war 2002 auch schon eine Massenveranstaltung mit 155 000 Teilnehmern.

Der Wettbewerb ist auf ein Minimum an technischem Aufwand hin ausgelegt: Mitmachen darf jede Schule, die mindestens 15 Teilnehmer meldet und pro Teilnehmer zwei Euro überweist. Am Stichtag bekommen die Kandidaten in einer Klausur dreißig Fragen (die jüngsten 21) vorgelegt. Aus fünf vorgegebenen Antwortmöglichkeiten ist die einzig richtige anzukreuzen. Die Lösungszettel wandern in ein Beleglesegerät, und einige Wochen später geht an jede der Schulen ein Paket mit individuellen Urkunden, Aufgaben- und Lösungsheften und Anerkennungsgeschenken.

Die Organisation für ganz Deutschland liegt in den Händen einer einzigen Person: der Berliner Mathematikerin Monika Noack. Ein Büro an der Humboldt-Universität, in den Stoßzeiten etliche Hilfskräfte zum Verpacken, bescheidene Sponsorengeschenke und die Teilnahmegebühr – damit bewältigt die Organisato- ▷

Auf dem »Mathe-Camp« im September 2002 in Münster (Westfalen) präsentierten die Teilnehmer stolz ein in Gemeinschaftsarbeit gefertigtes Sierpiński-Tetraeder.



CHRISTOPH PÖPPE

KOMMENTAR

Abgestürzt

Bemannte wie unbemannte Raumfahrt stecken in der Krise.

Die Katastrophe weckte schmerzliche Erinnerungen. Als am 1. Februar die US-Raumfähre Columbia vom Himmel stürzte und sieben Astronauten in den Tod riss, mischten sich unter Schock und Trauer die ins Gedächtnis eingebrannten Bilder vom letzten Unglück der bemannten Raumfahrt: der Explosion des Spaceshuttles Challenger. Damals – fast auf den Tag genau 17 Jahre zuvor, am 28. Januar 1986 – kamen ebenfalls sieben Menschen ums Leben. Weitere 19 Jahre zuvor, am 27. Januar 1967, waren die ersten Opfer des US-Raumfahrtprogramms zu beklagen, als drei Astronauten in einer Apollo-Kapsel verbrannten.

Ist etwa die Zeit vier Wochen nach dem Jahreswechsel besonders risikoreich für bemannte Missionen? Spiegelt sich in der Spanne zwischen den Unglücken die mittlere Wirkungsdauer einer Managergeneration, die typische Halbwertszeit, mit der notwendiges Sicherheitsbewusstsein über vermeintliche Alltagsroutine zur verantwortungslosen Schlamperei zerfällt?

Solche Zahlenmystik ist gewiss abwegig. Jeder der genannten Unglücksfälle ist singulär, hat seine eigene Ursache. Rationale Erklärungen müssen her. Sie zu finden ist Sache der unabhängigen Untersuchungskommission. Hat wirklich beim Start ein vom Tank abgefallenes vereistes Stück der Isolation die linke Tragfläche der Raumfähre beschädigt? Führten Einsparungen bei der Qualitätskontrolle zu Sicherheitsmängeln? Spielte das verstärkte Auslagern von Managementaufgaben an externe Firmen eine Rolle? Sind die Raumfähren hoffnungslos überaltert? Der Abschlussbericht der Kommission wird es wohl zeigen. Danach muss die Nasa Konsequenzen ziehen: technische Modifikationen, Änderungen der Sicherheitsphilosophie, Veränderungen im Management, Wechsel der Auftragnehmer.

Es wird ebenfalls zu klären sein, ob die Katastrophe hätte vermieden werden können. Warum hat man die Besatzung nicht angewiesen, während ihrer Mission den Flügel der Raumfähre zu inspizieren? Gewiss, es hätte die wissenschaftlichen Arbeiten beeinträchtigt, weil ein oder zwei der Astronauten aus dem Shuttle hätten aussteigen müssen – aber es wäre technisch möglich gewesen, und es hätte Klarheit über das Ausmaß des Schadens verschaffen können.

Doch welche Optionen hätte es gegeben? Zuflucht in der Internationalen Raumstation ISS suchen? Das war unmöglich, weil sich Shuttle und Raumstation auf unterschiedlichen Umlaufbahnen bewegten. In der Raumfähre ausharren? Immerhin war die Columbia für eine Langzeitmission ausgerüstet, und die Raumfähre Atlantis hätte am 1. März zu einer regulären Mission starten sollen. Wäre also mit Atlantis ein Rettungsflug machbar gewesen? Die Nasa muss das beantworten.

Jedenfalls bedeutet das Columbia-Unglück einen herben Rückschlag für die bemannte Raumfahrt. Solange die Ursache nicht geklärt und beseitigt ist, bleibt es wohl beim Startverbot für die verbliebenen drei US-Raumfähren. Damit gerät aber auch der Zeitplan für den Ausbau und den Betrieb der ISS – ohnehin schon unter Geldmangel leidend – in weitere Bedrängnis. Die gegenwärtige Langzeitbesatzung der ISS ist indes nicht gefährdet: Sie kann jederzeit mit einer russischen Sojus-Kapsel zur Erde zurückkehren.

Das tragische Unglück lässt fast vergessen, dass auch die unbemannte Raumfahrt derzeit in einer Krise steckt, zumindest die europäische. Seit am 12. Dezember eine modifizierte Ariane 5 bei ihrem Start versagte, darf keine dieser Trägerraketen abheben. Daran scheiterte bereits die Rosetta-Mission, die eine Raumsonde zum Kometen Wirtanen bringen sollte.

Es sind schlechte Zeiten für neue Raumfahrt-Pläne.

Uwe Reichert

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

▷ rin, die das Handwerk der Begabtenförderung schon zu DDR-Zeiten erlernt hat, jedes Jahr einen Materialumsatz von mehreren Tonnen.

Aber Multiple Choice! Alle faulen Tricks sind erlaubt, bis hin zum wilden Drauflosraten. Was das Wesen der Mathematik ausmacht, das sorgfältige Durcharbeiten bis zur kristallenen Klarheit der Gedanken, das genau wird nicht gefordert. Ausgerechnet die Methode, die Jahr für Jahr den Medizin-Prüflingen das selbstständige Denken aus dem Hirn treibt, soll die Schüler beglücken?

Sie tut es. Sich mit einem Sortiment origineller, kniffliger Aufgaben herumzuschlagen ist Vergnügen genug. Hinterher liefert die Punktzahl noch eine gewisse Selbsteinschätzung, und das auch in Bereichen, wo die Schulnoten keine Differenzierung mehr bieten: Selbst für notorische Einserkandidaten ist es fast unmöglich, die volle Punktzahl zu erreichen.

Die Punktbesten werden zu einwöchigen internationalen »Mathe-Camps« eingeladen, auf denen professionelle Mathematiker den wachen Geistern weitere Nahrung anbieten (siehe Bild Seite 95). Ferien unter Gleichgesinnten sind immer attraktiv, auch wenn die Arbeitssprache Englisch – bei aller Begabung – 14- bis 16-Jährige aus vielen verschiedenen Ländern, gelegentlich auch deren Betreuer, vor ernste Probleme stellt.

Was aber dem »Känguru« seinen Erfolg verschafft, sind die Aufgaben selbst. Die geballte Kreativität vieler Einzelkämpfer-Organisatoren aus ganz Europa erzeugt jedes Jahr aufs Neue einen Fragenkatalog, der nicht nur die Schüler motiviert. Auch für die Lehrer ist das Heft mit den Aufgaben und Lösungen, angereichert mit ein paar zusätzlichen Problemen und zur Auflockerung des Unterrichts verwendbar, genügend Anreiz, die Mühsal des Geldeinsammelns, Beaufsichtigens, Versendens und Preiseverteilens auf sich zu nehmen. ◁

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

INFORMATION

▶ Einzelheiten zum Ablauf samt Online-Anmeldeformular finden sich unter www.mathe-kaenguru.de. Offizieller Anmeldeschluss für den diesjährigen Wettbewerb ist der 21. Februar; später eingehende Anmeldungen werden im Rahmen des Möglichen bedient.

LEXIKON

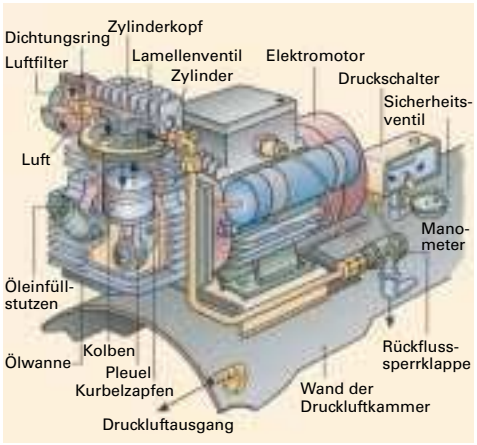
Brockhaus-Redaktion (Hg.)

Der Brockhaus

Naturwissenschaft und Technik

F. A. Brockhaus, Mannheim, und Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2003. 3 Bände mit CD-Rom, 2300 Seiten, € 199,90 (bis 31. 3. 2003), später € 239,90

Der alte »Brockhaus – Naturwissenschaften und Technik« von 1983 hat mir nun fast zwei Jahrzehnte lang gute Dienste geleistet, auch wenn es immer wieder ein umständliches Hantieren war, den Stichwortverweisen durch fünf Paperbacks hindurch zu folgen. Nun also sein druckfrischer Nachfolger – drei Hardcoverbände plus CD-Rom. Auf den ersten Blick ist er größer, bunter, reichhaltiger und dabei handlicher als sein Vorgänger; bei näherer Prüfung entpuppt er sich als ein fast völlig neues Lexikon.



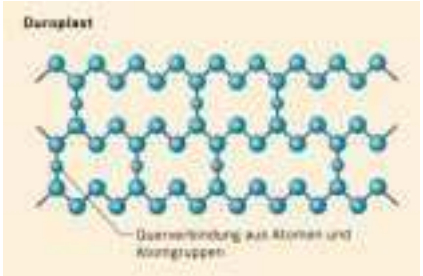
Verdichter: Teilschnittdarstellung eines Hubkolbenverdichters

Die auffallendste Neuerung ist das weite Feld der Biologie, das im »alten« Wissenschaftsbrockhaus fast ganz fehlte und nun ausführlich zu seinem Recht kommt. Eine Bereicherung sind auch zahlreiche biografische Stichworte zu einzelnen Naturforschern, die an die Menschen hinter den Fakten erinnern. Großer Modernisierungsbedarf bestand bei Stichwörtern aus Informatik und Computertechnik. Das Thema »Quantencomputer« konnte im alten Lexikon noch nicht enthalten sein und wird nun in einem eigenen Essay »Quanteninformatik« gründlich behandelt. Überhaupt sind die zahlreichen Essays zu allgemeinen (»Materie«, »Wissen«, »Denken«) und speziellen Themen (»Bose-Einstein-Kondensation«, »Fullerene«, »Schrödingers Katze«) ein Gewinn für den Nutzer, der in 20 000 Artikeln mit 45 000 Stichwörtern die Orientierung zu verlieren droht.

Die CD-Rom enthält das gesamte Lexikon mit allen 3000 Abbildungen und 350 Tabellen in besonders rasch zugänglicher Form. Man gibt ein Suchwort ein und wird sofort per Volltextsuche zu allen Fundstellen geführt – ganze Lexikoneinträge oder auch nur das fragliche Wort im laufenden Text. Außerdem erhält der Käufer ein Jahr lang kostenlosen Zugang zum Online-Portal www.naturwissenschaft-und-technik.de, das unter anderem einen »permanent aktuellen Informationsservice aus der Welt der Wissenschaft« verspricht.

Die CD-Rom erlaubt auch besonders einfache Stichproben, ob der Redaktion das Ziehen von Grenzen gelungen ist: Jedes Thema darf nur bis zu einer gewissen Tiefe dargestellt werden. Insbesondere sollte in der Erklärung kein Fachausdruck vorkommen, der nicht dortselbst oder durch Verweise andernorts erklärt wird.

Diese Aufgabe wurde – so das Ergebnis von Stichproben im Bereich Physik – fast immer zufrieden stellend gelöst, aber nicht ausnahmslos. So bleiben die »holonomen und nicht-holonomen Systeme« im Stichwort »Lagrange-Funktion« unerklärt. Das alte Lexikon enthielt hingegen einen knappen Eintrag dazu. Noch ein Beispiel: Am Ende des Stichworts »Wellenfläche« findet sich das rätselhafte Satzfragment »Zu inhomogenen Medien (z. B. Kristallen) Strahlengeschwindigkeit.« Was da wohl gemeint war?



Polymere: Die relativ weichen Thermoplaste sind nur ineinander verhakt, Duroplast hingegen durch chemische Bindungen vernetzt und dadurch deutlich fester.

Um im Rahmen von drei prallen Bänden Platz für die Neuerungen wie Essays, Kurzbiografien und vor allem für die ausgiebige Behandlung von Biologie und Biochemie zu schaffen, musste auf Themen verzichtet werden, die im alten Lexikon noch breiten Raum beanspruchten. Im Wesentlichen war es die Technik, die Federn lassen musste. Zahlreiche Stichwörter zu Metallverarbeitung, Maschinen- und Bergbau wurden ebenso geopfert wie der gesamte Bereich der Militärtechnik, der zur Zeit des Kalten Krieges wohl mehr Interesse fand.

Vermutlich spiegelt sich in dem Zurücktreten der klassischen Verfahrenstechnik die zunehmende Automatisierung der Produktion wider: Tätigkeiten wie Spanen, Bohren und Schleifen werden fast nur noch über Bildschirme und computergesteuerte Abläufe erlebt. Dafür enthält das moderne Technik-Lexikon eigene Essays zu »Bionik«, »Bioethik«, »Biodiversität« und »Biotechnologie«. So ändern sich die Zeiten.

Alles in allem ist die Sisyphusarbeit, den wissenschaftlich-technischen Kenntnisstand in ein kompaktes Nachschlagewerk zu bannen, eindrucksvoll gelungen.

Wenn man den alten und den neuen Wissenschaftsbrockhaus vergleicht, drängen sich typische Science-Fiction-Fragen auf: Wie wird wohl ein lexikalischer Schnappschuss des Wissens in zwanzig Jahren aussehen? Wird man Papier in Händen halten oder ein elektronisches Buch? Wird es einen Essay »Der Mars als künstlicher Lebensraum« geben? Einen Rückblick auf die Ära der fossilen Brennstoffe? Stichworte zu Nano-Militärtechnik und Biowaffen-Sensorik? Zur globalen Wasserstoff-Energietechnik? Zum Stand der Fortpflanzungstechnologie? Zur Teleportation makroskopischer Objekte? Zur Biotechnik intelligenter Automaten? Der Leser gerät ins Träumen – kein schlechtes Kompliment für ein Lexikon.

Michael Springer

Der Rezensent ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.

ZOOLOGIE

David Burnie (Hg.)

Tiere

Die Große Bild-Enzyklopädie mit über 2000 Arten

Aus dem Englischen von Gabriele Lehari, Christiane Gsänger und Toni Neuner. Dorling Kindersley, München 2001. 624 Seiten, € 66,–

Alles über Tiere, und das in einem Band? Für einen Zoologen ist die Vorstellung zugleich faszinierend und verwirrend, auch wenn der Band groß und schwer ist. Schließlich schätzt man die Zahl der Tierarten auf irgendwo zwischen zehn und fünfzig Millionen.

Der Vielfraß macht in kalten Wintern leichter Beute. Da er sehr schnell über gefrorenen Schnee laufen kann, fängt er selbst so große Tiere wie Rentiere, die ihm im Sommer leicht entkommen.

Natürlich ist so ein Buch gewichtet nach öffentlichem Interesse, nicht nach Artenzahlen. Die Säuger beispielsweise kriegen 174 Seiten, die »Wirbellosen« nur 76. Während bei Säugern manche Ordnungen bis zu 25 Seiten erhalten, haben nur neun Stämme der Wirbellosen überhaupt eigene Kapitel, und viele davon gerade mal eine Seite.

Aber das Buch ist prall mit Information gefüllt. Eine typische Doppelseite zeigt bis zu zehn Arten, sämtlich mit Farbbildern, dazu mindestens ebenso viele Verbreitungskarten und zu jeder Art Angaben über Größe, Gewicht, Sozialstruktur, Bestandsgefährdung, Piktogramme für den Lebensraum und einen Textblock mit sonstigem Wissenswerten.

Die 73 Textautoren sind allesamt sehr bekannte und in ihrem Spezialgebiet ausgewiesene Fachleute. Ihnen standen wissenschaftliche Berater zur Seite: je einer für Säuger, Vögel, Reptilien, Amphibien und Fische und drei für die Wirbellosen.

Besonderen Wert, so der Herausgeber David Burnie im Vorwort, legte man einerseits auf die Probleme des Artenschutzes, andererseits auf die Darstellung neuester Erkenntnisse. So werden Afrikanischer Waldelefant, Borneo- und Sumatra-Orang, Östlicher und Westlicher Gorilla als eigene Arten geführt – was zum Beispiel beim Orang noch keineswegs die Mehrheitsmeinung der Taxonomen ist. An einigen Stellen erscheint die Aufsplitterung auch suspekt. Mir ist noch nie ein seriöses Lehrbuch begegnet, das zehn Arten von Pferdeartigen aufzählt, und dieses Buch zeigt auch nur fünf (Bergzebra als sichere und Kiang als fragliche Art sind nicht dargestellt).

Auf den oberen Ebenen ist dafür die Klassifikation stellenweise zu grob und veraltet. So verwenden die Autoren den alten Begriff »Halbaffen« weiter und stellen den Koboldmaki dazu, obwohl die seit langem übliche Klassifikation nach feuchter oder trockener Nase ihn deutlich näher zu uns als zu den Lemuren und Loris stellt. Die Robben werden noch als eigene Ordnung geführt, obwohl ihre enge Verwandtschaft mit den Landraubtieren das nach heutiger Auffassung nicht mehr rechtfertigt, und die Wale stehen nicht bei den Paarhufern, wo sie nach neuesten Erkenntnissen hingehören (Spektrum der Wissenschaft 7/2002, S. 26). Die Beuteltiere sind nach heutiger Mehrheitsmeinung in fünf Ordnungen anstatt in eine einzugliedern. Auch auf der höchsten Ebene der Systematik gibt es Widersprüche zu modernen Biologiebüchern: Archäbakterien und Protisten werden als Reiche des Lebens schlicht unterschlagen.

Das Buch beginnt mit einer Reihe von einführenden Kapiteln. Eine tabellarische systematische Grobübersicht sowie für jede Klasse eine Doppelseite zu Anatomie, Verhalten und Lebenszyklen können nur sehr oberflächliche Informationen geben. Besser sind schon die Kapitel über Gefährdung und Schutz sowie über die wichtigsten Ökosysteme und die Anpassungen der Tiere daran. Erfreulicherweise bekommen auch die Stadtlebensräume ein solches Vier-Seiten-Kapitel. Sehr gut und verständlich ist auch die Einführung in Evolutionsgeschichte und Systematik; sogar die kladistische Methode der Stammbaumrekonstruktion ist gut dargestellt.

Im Hauptteil des Buches werden zunächst für jede Tiergruppe (alle Klassen der Wirbeltiere, auffällige Großgruppen der Wirbellosen) Gemeinsamkeiten in Anatomie, Physiologie, Ökologie und Verhalten zusammengefasst; einzelne Kapitel (bei den Wirbeltieren auf Ordnungsniveau oder noch darunter) gehen dann auf Details ein. Beispielsweise bringt das Buch für die Raubtiere (Carnivora) zunächst auf einer Doppelseite neun Farbfotos, zwei anatomische Zeichnungen und Kurzbeschreibungen zu Anatomie, Jagdverhalten, Ernährung, Kommunikation, Sozialstruktur und Systematik. Es folgen acht Seiten für die Hunde, davon wieder eine für die Familie insgesamt, mit allgemeiner Cha- ▷

Der Borneo-Flugfrosch *Rhacophorus nigropalmatus*

(Seiten 100 bis 102: Anzeige und Beihefter)

rakteristik, Anatomie, sozialen Gruppen und Beziehung zu Menschen. Die restlichen sieben Seiten sind insgesamt 25 Arten gewidmet. Der Wolf hat dabei eine eigene Doppelseite, während die anderen Arten je nach »Bedeutung« oder unserem Kenntnisstand mit bescheidenerem Platz vorlieb nehmen müssen. Die anderen Raubtierfamilien folgen dann in vergleichbarem Stil.

Das Buch endet mit je einer Tabelle für bedrohte Arten pro Großkapitel, einem vierseitigen Glossar mit etwa 250 Begriffen sowie 22 fünfspaltigen Registerseiten, die sämtliche besprochenen Arten mit ihren deutschen und wissenschaftlichen Namen sowie die wichtigsten allgemeinen Begriffe enthalten.

Alles, was da steht, ist interessant, mitteilenswert und zum größten Teil auch aktuell und korrekt. Wer die vergleichsweise wenigen Fehler mit sicherem Blick entdeckt oder sich nichts aus ihnen macht, dem kann das Buch vorbehaltslos empfohlen werden. Also ein Buch für interessierte, tierbegeisterte Laien und für absolute Fachleute zugleich.

Den Studierenden würden die – vermeidbaren – Schwächen schon stören. Aber die beiden anderen Zielgruppen gleichermaßen zu bedienen ist schon fast so eine Meisterleistung wie das monumentale Buchprojekt selbst!

Udo Ganslosser

Der Rezensent ist Privatdozent am Institut für Zoologie der Universität Erlangen-Nürnberg.

MEDIZIN

Claudia Eberhard-Metzger und Renate Ries

Die Macht der Seuchen

Mensch und Mikrobe – eine verhängnisvolle Affäre

Hirzel, Stuttgart 2002. 184 Seiten, € 19,80

Rund um den Globus sind Infektionskrankheiten wieder auf dem Vormarsch; und die medizinische Wissenschaft hat die Herausforderung angenommen. So gibt es seit drei Jahren die Fachzeitschrift »Emerging Infectious Diseases« mit einem einzigen Thema: neu und wieder auftretende Infektionskrankheiten; Onlinedienste veröffentlichen täglich epidemiologische Bulletins, und die Zahl der einschlägigen Veröffentlichungen ist in den vergangenen Jahren exponentiell angestiegen.

Im vorliegenden Buch informieren zwei bekannte Wissenschaftsjournalistinnen in flotter Sprache und gut strukturiert über wichtige »alte Bekannte« (Tuberkulose, Cholera, Malaria, Gelbfieber, Denguefieber und Hepatitis), Krankheiten, die immer für eine Schlagzeile gut sind (Ebola-, Marburg-, Lassa-Fieber, Aids), und echte »Newcomer« (Rinderwahn und Creutzfeldt-Jakob-Krankheit). Der Leser erfährt viel Historisches und wird durch zahlreiche Anekdoten bei Laune gehalten. Für ein tieferes Eingehen auf die wissenschaftlichen Aspekte fehlte aber wohl der Platz.

Die Zwischenüberschriften (die vermutlich vom Lektor und nicht von den Autorinnen stammen) sind überflüssig reißerisch: »Porträt eines Mörders«, »Dämon aus dem Busch« über das Ebola-Virus, »Tal des Todes« über die Hanta-Viren. Der Titel »Die Macht der Seuchen« geht am Thema vorbei. Auch ist das Verhältnis zwischen Mensch und Mikrobe mehr als nur »eine verhängnisvolle Affäre«.

Einen Verweis auf weiterführende Literatur sucht der Leser vergebens. Immerhin räumen die Autorinnen mit dem naiven Paradigma auf, dass Erreger wie konventionelle militärische Gegner bekämpfbar und besiegbar seien (letztes Kapitel) und weisen klar darauf hin, dass die Renaissance der Infektionskrankheiten in vielen Fällen »hausgemacht«, will heißen eine Folge menschlichen Handelns ist (erstes Kapitel).

Insgesamt ist das Buch eher leichte Kost für den interessierten Laien als ein Werk, das sich ein Arzt oder Wissenschaftler in sein Regal stellen würde. Hinter dem Klassiker »Die kommenden Plagen« von Laurie Garrett, auf den die Autorinnen direkt und indirekt immer wieder Bezug nehmen, bleibt es um Längen zurück.

Hermann Feldmeier

Der Rezensent ist Arzt für Mikrobiologie und Infektionsepidemiologie und Professor für Tropenmedizin an der Freien Universität Berlin.

ZOOLOGIE

Martin Brookes

Drosophila

Die Erfolgsgeschichte der Fruchtfliege

Aus dem Englischen von Hubert Mania.
Rowohlt, Reinbek 2002. 254 Seiten, € 22,90

Wohl jeder, der sich schon einmal auch nur oberflächlich mit Biologie befasst hat, kennt sie: *Drosophila*, jene unscheinbare kleine Fliege, an der in Genetik, Entwicklungsbiologie und vielen anderen biologischen Teildisziplinen eine Fülle grundlegender Erkenntnisse gewonnen wurde.

Der britische Biologe und Autor Martin Brookes hat diesem Hauptdarsteller auf der Bühne der Wissenschaft ein amüsant zu lesendes Buch gewidmet. Er berichtet über so ziemlich alle Forschungsgebiete, in denen der kleine Zweiflügler schon einmal eine Rolle gespielt hat. Einleitung und acht weitere Kapitel schildern die Entwicklung der Chromosomentheorie, die Entdeckung und Analyse von Mutanten, Kontrollgene und Embryonalentwicklung, Evolutionsforschung und Populationsgenetik, Verhaltensforschung, Entstehung der Sexualität, Alterungsforschung und entwicklungsgeschichtliche Artbildung. Und natürlich kommen sämtliche großen Gestalten aus der Biologie des 19. und 20. Jahrhunderts vor: von Darwin über Thomas Hunt Morgan, Theodosius Dobzhansky und Seymour Benzer bis hin zu Christiane Nüsslein-Volhard ist die Prominenz vollzählig versammelt.

Die betont locker-flockige Sprache lässt das Bemühen erkennen, den Leser bei der Stange zu halten. Jedes Kapitel beginnt nach Art eines guten Zeitungsartikels mit einer kleinen Anekdote, die zwanglos zum jeweiligen Thema hinführt. Mir persönlich geht dieses Bestreben, dem Leser gefällig zu sein, ein wenig zu weit, insbesondere wenn Brookes die Fliege vermenschlicht und ihr beispielsweise eine »Zen-artige Seelenruhe« andichtet.

Immerhin erhält der Laie interessante Einblicke in Themen und Geschichte der biologischen Forschung. Dennoch konnte ich mich eines unguten Gefühls nicht erwehren. Abgesehen davon, dass es immer um *Drosophila* geht, ist in dem Buch kein roter Faden zu erkennen. Die Anordnung der Ka-

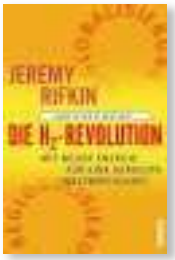
▷ pitel folgt weder der Chronologie noch einem anderen Ordnungsprinzip. So wird das Buch zu einer ungeordneten Sammlung einzelner, gewiss vergnüglicher und lehrreicher Geschichten, aber eben keine »Erfolgsgeschichte«. Dass ein unvorbereiteter Leser sich daraus ein Gesamtbild von der wissenschaftlichen Bedeutung der *Drosophila* machen kann, wage ich zu bezweifeln.

Die Übersetzung ist im Großen und Ganzen gut gelungen. Ein paar kleinere Schnitzer – so heißt es nicht »der Mutant«, sondern »die Mutante«, und nicht »Sedimentärgestein«, sondern »Sedimentgestein« – stören nicht weiter.

Ärgerlich ist aber der eine große Übersetzungsfehler, der sich durch das ganze Buch zieht und auch im Untertitel nicht fehlt: Anders als im ersten Kapitel behauptet wird, ist *Drosophila* kein »falscher Namensvetter« der Mittelmeer-Fruchtfliege (*Ceratitis capitata*). *Drosophila* heißt auf Deutsch nicht Fruchtfliege, sondern Taufliege!

Sebastian Vogel

Der Rezensent ist promovierter Biologe und Wissenschaftspublizist in Köln.



WELTWIRTSCHAFT

Jeremy Rifkin

Die H_2-Revolution

Mit neuer Energie für eine gerechte Weltwirtschaft

Aus dem Englischen von Brigitte Kleidt.
Campus, Frankfurt am Main 2002. 304 Seiten, € 25,50

Der Autor Jeremy Rifkin träumt von der Zukunft wie andere von der Herabkunft des Messias: Machtvoll und so rasant wie das World Wide Web wird sich ein weltweites Wasserstoffenergienetz über unseren Planeten legen und unsere Volkswirtschaften revolutionieren. Sauberer und unbegrenzt verfügbarer Wasserstoff wird dezentral produziert und konsumiert. Millionen von Energieverbrauchern zwingen die Ölkonzerne und die islamischen Ölproduzenten in die Knie. Kein Land mehr muss sich für Öl verschulden, und der Abgrund zwischen den Wohlhabenden und den Habenichtsen wird überwunden.

Rifkin, der Prediger der letzten Tage der fossilen Hochkultur, kündet in seinem sechzehnten Buch vom Segen des Wasserstoffs für alles Irdische. Tief in die Gesellschaftsstruktur wird der Urstoff des Universums wirken: Zum ersten Mal in der Geschichte wird eine wirklich demokratische, dezentrale Form menschlichen Zusammenlebens denkbar. Selbst das Konzept des Nationalstaats wird disponibel, denn es ist eine Erfindung der Kohlenwasserstoffära. Rifkin, der »Intellektuelle und Querdenker« (Klappentext), kennt längst die Weichenstellung für die Zukunft: Die geopolitische Zersplitterung, welche die gesamte Ära der fossilen Brennstoffe prägte, wird im Wasserstoffzeitalter einer biosphärischen Politik weichen. Und etwas esoterischer gewendet: Wir werden uns selbst als Teil eines gesamtweltlichen Organismus erleben.

Immerhin: Für die Rohstoffkrise, die Rifkin daherkommen lässt wie einen Reiter der Apokalypse, sprechen handfeste Fakten. Versiegt der Fluss billigen Erdöls aus den unterirdischen Lagerstätten, geraten unsere Volkswirtschaften aus dem Tritt. Elektrischer Strom wird knapp, die Industrieproduktion wird heruntergefahren, und die Menschen frieren in ihren Häusern. Selbst die Mägen bleiben leer: Zwischen Acker und amerikanischem Supermarktregal verschlingt die Versorgung mit Lebensmitteln, dank hochmotorisierter Landwirtschaft und ressourcenzehrender Lebensmittelproduktion und Distribution, siebzehn Prozent der in den USA erzeugten Energie. Die Räder stehen ohnehin still: Mehr als die Hälfte des amerikanischen Ölkonsums wird in Fahrzeugmotoren verfeuert.

Neue Studien datieren den Zeitpunkt dieses Szenarios in die nahe Zukunft, warnt Rifkin, Gründer und Vorsitzender der Foundation on Economic Trends in Washington, in seinem neuen Buch. Nach gerade einmal zehn Generationen, welche die Energieschätze unserer Erde hemmungslos plündern konnten, kündigt sich schon das Ende des fossilen Zeitalters an. ▷

PHYSIK

Claus Kiefer

Quantentheorie

Fischer, Frankfurt am Main 2002.
127 Seiten, € 8,90

Gert-Ludwig Ingold

Quantentheorie

Grundlagen der modernen Physik

C. H. Beck, München 2002.
128 Seiten, € 7,90

Wissensgebiete einem breiten Publikum in knapper Form zu vermitteln – das ist das Ziel der Reihen »Fischer kompakt« und »C. H. Beck Wissen«. Bei einem Thema wie »Beethovens Klaviersonaten«, »Psoriasis« oder vielleicht sogar »Islam« mögen die 128 Seiten für einen gerafften Überblick ausreichen. Lässt sich aber auch die Quantentheorie so knapp und gleichzeitig verständlich darlegen?

Claus Kiefer, Professor für Theoretische Physik an der Universität zu Köln, schafft diesen Spagat nicht. Sehr früh im Text operiert er unvermittelt mit Fachvokabular und Formeln, sodass der interessierte Laie bereits auf Seite 6 aufgeben muss.

Gert-Ludwig Ingold gibt dem Leser in seinem Buch mehr Chancen. Der Professor für Theoretische Physik an der Universität Augsburg widersteht der Versuchung, Formeln zu benutzen, holt beim Grundsätzlichen etwas weiter aus und zieht zum besseren Verständnis hin und wieder Parallelen zum Alltagserleben. Dass er in das Geschehen sowie die Historie der Quantenphysik Anekdoten von den großen Physikern einwebt, macht das Lesen richtig spannend.

Bei aller Hilfestellung bleibt die Lektüre ein gutes Stück Arbeit. Aber die Mühe lohnt sich. Denn man gewinnt aus Ingolds Buch eine recht gute Vorstellung von der Quantentheorie und ihren atemberaubenden Dimensionen. Und man spürt den Hauch der Faszination, welche die Teilchenphysik auch auf Laien ausübt.

Eva Kahlmann

Die Rezensentin ist Redaktionsassistentin bei Spektrum der Wissenschaft.

wissenschaft-online

Home | Kontakt | Hilfe | AGB | Ihr Konto | Login | Warenkorb

Fachwissen | Nachrichten | Community | Unterhaltung | Service | Science-Shop

Bücher und CD-ROMs | Science & Fun | Software | Zeitschriften | Abonnements | Reisen | Warenkorb

Fachgebiete
Archäologie
Astronomie
Biologie
Chemie
Geowissenschaften
Mathematik
Medizin
Physik
Technik

ScienceShop

Bücher | Zeitschriften | Science & Fun | Software | Reisen | Abonnements

Unsere Tipps im März!

Neu

Neues vom Bestsellerautor Robert L. Wolke

Robert L. Wolke

■ Was Einstein seinem Koch erzählte

Naturwissenschaft in der Küche

2003, ca. 384 S., geb. Piper Verlag, € 19,90

„Was Einstein seinem Friseur erzählte" wissen wir schon. Was aber hat Einstein seinem Koch erzählt? Physikalische Tatsachen rund um den Kochtopf: Kocht Alkohol wirklich, wenn wir Wein verwenden? Sind grüne Kartoffeln giftig? Warum muss Salz ins Nudelwasser? Das Buch enthält außerdem viele ungewöhnliche Rezepte, quasi ein Laborpraktikum, dessen Ergebnisse man essen kann.

Neu

Mit Rudolf Kippenhahn im Weltall zu Hause

Rudolf Kippenhahn

■ Kosmologie für die Westentasche

2003, ca. 120 S., lam. Pappband, Piper Verlag, € 9,90

Hat es den Urknall wirklich gegeben? Kann etwas schneller als das Licht sein? Warum können wir uns den krummen Raum nicht vorstellen? Rudolf Kippenhahn, der erfahrene Astrophysiker und Bestsellerautor stellt in diesem Büchlein die wichtigsten kosmologischen Begriffe und Themen kurz und bündig vor. Sein Ziel ist es, das Unvorstellbare verstehbar zu machen.

Neu

Sparpreis: Früher € 25,90 jetzt nur € 14,90!

■ Meyers kleine Enzyklopädie Mathematik:

Für Schule, Studium u. Praxis. Mit zahlr. Beisp. u. Anwend.

1995, 810 S. m. zahlr. meist zweifarb. Abb. u. 30 Bildtaf., geb., Meyers Lexikonverlag, € 14,90

Ein wissenschaftlich fundiertes und systematisches Nachschlagewerk, das sich besonders zum Auffrischen von Kenntnissen und zum Selbststudium eignet. Mathematisches Basiswissen für Schule, Studium und Beruf mit zahlreichen Beispielen und Anwendungen.

Preiswerte Sonderausgaben der Erfolgstitel zum Jahr der Chemie 2003

John Emsley

■ Parfum, Portwein, PVC

Chemie im Alltag

2003, 384 S., 5 Abb., 23 Tab., Broschur, Wiley-VCH, € 12,50

Was haben ein Hauch Chanel No. 5 und ein Honigbrötchen gemeinsam? Richtig, es sind Gemische chemischer Substanzen! Der Autor vermittelt fundiertes Hintergrundwissen zu Chemikalien, mit denen wir täglich zu tun haben.

Früher € 24,90, jetzt € 12,50!

John Emsley

■ Sonne, Sex und Schokolade

Mehr Chemie im Alltag

2003, 288 S., 7 Tab., Broschur, Wiley-VCH, € 12,50

Emsleys preisgekrönter Erfolgstitel *Parfum, Portwein, PVC* ... Chemie im Alltag verlangte eine Fortsetzung. Hier ist sie!

Neu

Auf den Spuren antiker Tüftler und Erfinder

Rita Amedick

■ Wunder Antiker Technik CD-ROM

Automaten – Orgeln – Uhren – Wasserspiele

CD-ROM mit zahlreichen Texten, gesprochenen Kommentaren und Bildern, animierten 2-D- und 3-D-Modellen, Videos, Zeittafel, Bauanleitungen und Grafiken zum Ausdrucken. In praktischer DVD-Verpackung. Ab Windows 95, 2003, Theiss Verlag, € 29,90

Ausgehend von archäologischen und schriftlichen Quellen präsentiert diese CD-ROM ausgewählte antike Meisterwerke der Technik und erläutert ihren jeweiligen kulturgeschichtlichen Hintergrund. Bildliche Darstellungen und erhaltene Überreste von Uhren und Orgeln, Brunnen und kostbaren Gefäßen vermitteln ein anschauliches Bild der Gegenstände und Maschinen, die in den Texten beschrieben werden. Baupläne, Grafiken, animierte Modelle und Videos ermöglichen es, ihre Funktionsweise zu verstehen und ihre zum Teil überraschende Wirkung nachzuvollziehen.

Aus Hexenküche und Zauberlabor

Georg Schwedt

■ Chemische Experimente in Schlössern, Klöstern und Museen

Aus Hexenküche und Zauberlabor

2002, 239 S., 76 Abb., broschiert, Wiley-VCH, € 29,90

Wie passen chemische Experimente mit Schlössern und Kultur zusammen? Prima! Welche Tinten und Farbstoffe benutzte man in der mittelalterlichen Buchmalerei? Was kann man mit Bier und Tabak so alles „zusammenbrauen"? Georg Schwedt begeistert aufs Neue sein Publikum mit Experimentalvorträgen, gewürzt mit Historischem, Kulturellem und Chemie-Know-how.

Der ideale Ratgeber für den Hobby-Astronomen!

Werner E. Celnik
Hermann-Michael Hahn

■ Astronomie für Einsteiger

Schritt für Schritt zur erfolgreichen Himmelsbeobachtung

Neuaufl. 2002, 160 S. m. zahlr. farb. Abb., Kosmos Verlag, € 14,90

Dem Astro-Einsteiger stellen sich viele Fragen – dieses Buch enthält die Antworten. Ohne Fachwissen vorauszusetzen, führen die Autoren durch alle Gebiete der praktischen Himmelsbeobachtung. Angehende Sternfreunde finden hier alle wichtigen Informationen, die sie zur erfolgreichen Ausübung ihres Hobbys brauchen. Viele Tipps und Tricks, das nötige Hintergrundwissen und handfeste Anleitungen machen *Astronomie für Einsteiger* zum idealen Begleiter für zukünftige Sternstunden.

Weitere interessante Titel finden Sie im Internet:

www.science-shop.de

Besuchen Sie uns!

Bequem bestellen:

➜ direkt bei
www.science-shop.de

➜ telefonisch
06221/9126-841

➜ per E-Mail:
shop@wissenschaft-online.de

➜ per Fax:
06221/9126-869

Alle Preise verstehen sich inklusive Umsatzsteuer. Für den Versand berechnen wir Ihnen eine Pauschale von € 3,– (Ausland € 7,–)

Möglicherweise ist das Fördermaximum von Erdöl bereits im Jahr 2010 erreicht: Dann ist die Hälfte des globalen Förderpotenzials erschöpft, ab diesem Zeitpunkt nimmt nur noch der Mangel zu. Der Abbau von Ölschiefer ist unrentabel, und die Erdgasvorräte sind begrenzt. Knappheit, steigende Preise und unsichere Lieferungen angesichts der instabilen Lage im Nahen Osten werden die Folge sein.

Dem Ende des Kohlenwasserstoffzeitalters hält Rifkin seine Vision der »Wasserstoffwirtschaft« entgegen. Schon der Buchumschlag in glutfarbenem Orange verkündet die Botschaft: Wasserstoff ist der Brennstoff der Sonne, die saubere und unbegrenzte Energie. Bereits jetzt werden vier Milliarden Kubikmeter Wasserstoff jährlich produziert, allerdings vor allem mit Hilfe der umweltschädlichen Dampfreformierung aus Erdgas. Die hocheffiziente Elektrolyse scheitert bislang an den hohen Stromkosten; zum Durchbruch wird ihr erst die gebündelte Nutzung von Sonne, Wind, Wasser, Biomasse und Erdwärme verhelfen, so Rifkins Hoffnung. Direkt vor Ort sollen die erneuerbaren Energien zur Produktion von Wasserstoff genutzt werden. Mittels kleiner, dezentraler Brennstoffzellen – mal transportabel, mal stationär – erzeugen Energiekonsumenten ihren Strom selbst, so viel sie brauchen und wann sie ihn brauchen. Eine saubere Sache: Übrig bleiben nur reines Wasser und Wärme, die sogar zum Heizen verwendet werden kann.

In Rifkins Vision wachsen die vielen Minikraftwerke, verbunden durch ein intelligentes Computernetz, zu einem leistungsfähigen weltweiten Energienetz zusammen. Millionen kleiner Brennstoffzelleninhaber werden den Strom vor Ort dann billiger erzeugen können als die Versorgungsriesen mit ihren großen Kraftwerken. Selbst Autos werden sich, als Mini-Kraftwerke, im Wasserstoffnetz nützlich machen können. Wenn eine Flotte von fünfzig Millionen mit Brennstoffzellen ausgerüsteter Fahrzeuge ans allgemeine Stromnetz angeschlossen wird – Autos stehen während 96 Prozent ihrer Lebenszeit ungenutzt herum –, produziert sie so viel Strom wie das gesamte derzeitige Versorgungsnetz der USA.

Auch das sechzehnte Buch Rifkin kennt keine Erlösung

Ein amerikanischer Traum: jedes Auto unverzichtbarer Bestandteil der Gesellschaft, Unabhängigkeit von den Golfstaaten und eine gerechte Weltwirtschaft von Washingtons Gnaden. Und nur darum geht es. Damit der Leser dies auch wirklich versteht, schickt ihn Rifkin in die Wüste, wo unter dem Sand die weltweit größten Reichtümer an Schwarzem Gold lagern. Wer die Bedeutung der politischen Verhältnisse im Nahen Osten für die globale Energieversorgung zutreffend einschätzen will, müsse den Islam aus der Binnenperspektive kennen.

So beginnt Rifkin seine eigentlich verdienstvolle Einführung in die arabische Kultur. Doch sein aufklärerischer Eifer findet ein schnelles Ende. »Die muslimische Antwort auf die Globalisierung [ist] die Errichtung eines weltumspannenden islamischen Staates«, erfährt der Leser schon in der Einleitung des entsprechenden Kapitels. Dass der offene Konflikt und der Kampf zwischen den Kulturen ohnehin nicht zu vermeiden sei, liest er im Schlusssatz. Trotz basisdemokratischen Wasserstoffs, so erkennt er bitter, muss selbst ein gesamtweltlicher Organismus eine Immunabwehr gegen Fremdkörper errichten.

Am Ende lässt der Prophet seine Jünger im Stich. Allein gelassen wie zuvor schreiten sie durch das irdische Tal der Tränen, der Finanzierungsprobleme, der ungelösten technischen Fragen und der politischen und ökonomischen Sach- und Machtzwänge. Auch das 16. Buch Rifkin kennt keine Erlösung.

Thilo Körkel

Der Rezensent ist Diplomphysiker und Wissenschaftsjournalist in Frankfurt am Main.

HIRNFORSCHUNG

Erhard Oeser

Geschichte der Hirnforschung

Von der Antike bis zur Gegenwart

Primus, Darmstadt 2002. 288 Seiten, € 24,90

Die Hirnforschung ist eine der erfolgreichsten wissenschaftlichen Unternehmungen der Gegenwart«, stellt der Wiener Wissenschaftshistoriker Erhard Oeser fest, ihre Geschichte sei jedoch neben Erfolgsmeldungen auch durch »Irrtümer, Kontroversen und Grausamkeiten« gekennzeichnet. Oeser ist es in beispielhafter Weise gelungen, alle Dimensionen dieser Geschichte in flüssiger Sprache und zumeist sogar spannend aufzuweisen.

Die Darstellung erfolgt chronologisch und beginnt mit der schon in Steinzeitkulturen praktizierten Schädelöffnung (Trepanation), die »in den Bereich der medizinischen Hirnforschung hinein« reicht. Forscher der klassischen Antike hatten durch Experimente an lebenden Schafen den Unterschied zwischen sensorischen und motorischen (Sinnes- und Bewegungs-)Nerven entdeckt. In den Hohlräumen im Gehirn, den Ventrikeln, vermuteten sie den Sitz des lebendigen Geistes (*spiritus animalis*). Nach einer kurzen Würdigung mittelalterlicher Lehren geht Oeser zu den neuen, von mechanistischen Funktionsvorstellungen geprägten Konzepten der Renaissance über. Dem 19. und 20. Jahrhundert ist jeweils ein ganzes Kapitel gewidmet.

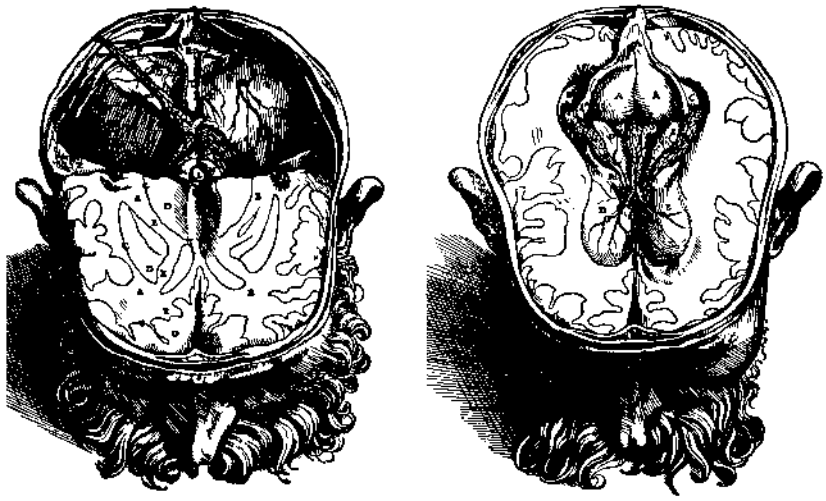
Über weite Passagen sind Oesers Ausführungen packend. Durch das ganze Buch zieht sich die Darstellung des mehrmaligen Wechsels zweier Grundauffassungen: Jede Leistung des Gehirns sei in einem bestimmten Areal lokalisiert (diese Auffassung nahm immer dann Aufschwung, wenn ein solches Areal entdeckt wurde); und im Prinzip sei jedes Stück Hirngewebe, vor allem in der Großhirnrinde, zu jeder Leistung fähig (»Äquipotenzialität«). Der Leser erfährt, welche Irrwege begangen wurden, bis der Zusammenhang von tierischer mit neuronaler Elektrizität zu Tage trat. Mit viel Sorgfalt werden Aufstieg und Fall der Phrenologie geschildert. Oeser beschreibt nicht nur, worüber die frühen Hirnforscher Santiago Ramón y Cajal (1852–1934) und Camillo Golgi (1843–1926) stritten, ob nämlich eine Nervenzelle ein strukturell autonomes Gebilde oder übergangslos mit ihresgleichen verbunden sei, sondern berücksichtigt auch die emotionale Dynamik dieses Teils der Geschichte. Gegen Ende seines Buches gibt Oeser eine Übersicht über die moderne Hirntod-Debatte.

Bemerkenswert ist auch die Dokumentation der zahllosen Grausamkeiten, die im Namen der Hirnforschung begangen wurden. In der Antike wurden nicht nur Verstümmelungen lebender Tiere, sondern auch Experimente an Verbrechern, »solan-

ge sie noch atmeten«, durchgeführt. Einige Forscher konnten ihre Vivisektionen nur mit Mühe vor sich selbst rechtfertigten, indem sie die Legitimität ihres Wissensdurstes beteuerten. Besonders grausam ging Friedrich L. Goltz (1834–1902) zu Werke, der große Teile des Gehirns von Hunden »mit Brunnenwasser« ausspülte, um zu erfahren, welche ihrer Verhaltensweisen danach noch übrig blieben. Oeser zitiert hier den Hirnforscher Roger Sperry (1913–1994), der die Geschichte seiner eigenen Wissenschaft als »Liste schwerer Straftaten« bezeichnet hat.

Oeser beeindruckt über weite Strecken durch die Präzision seiner Quellenarbeit und die differenzierte Darstellung divergierender Standpunkte. An vielen Stellen hat er dabei bisher unbekannte oder wenig beachtete historische Aspekte zu Tage gefördert und durch gut ausgewählte Zitate illustriert. Wichtige Entwicklungen werden jedoch übergangen. Zum Beispiel fehlen Hinweise auf die Psychophysik des 19. Jahrhunderts. Seine Darstellung der Geschichte der Hirnforschung im 20. Jahrhundert enthält nur am Rande eine Passage über das für die moderne Hirnforschung fundamentale Konzept des rezeptiven Feldes. Auch die Entwicklung zur heute dominierenden Vorstellung des Gehirns als informationsverarbeitendes Netzwerk wird nur gestreift. Bedauerlicherweise verweist Oeser bei der Behandlung der letzten fünfzig Jahre oft nur noch auf Sekundärliteratur.

Einige Feststellungen in diesem Buch hinterlassen einen skeptischen Leser. Im Dunkeln bleiben die Grundlagen für die Behauptung, »dass das Menschengehirn jenes organische System ist, das an Komplexität und Dynamik alle anderen Systeme im Universum weit übertrifft«. Ein Wissenschaftstheoretiker vom Schlage Oesers sollte wissen, dass die Voraussetzungen für eine Begründung dieser Aussage unerfüllbar sind. Auch die am Schluss des Buches auftauchende Feststellung, dass uns unser ebenso großartiges wie verletzbares Gehirn »zum Herren dieser Erde« gemacht hat, ist unnötig und vermutlich falsch: Erfolgreicher und nachhaltiger wird unser Planet von hirnlosen Bakterien bevölkert.



Gehirnventrikel in der Darstellung des Anatomie-Pioniers Andreas Vesalius (1514–1564)

Vergeblich sucht der Leser in diesem Buch nach Argumenten dafür, dass Wissenschaftsgeschichte zu studieren mehr ist als ein Selbstzweck. Oeser nimmt für sich in Anspruch, »eine Rekonstruktion des naturwissenschaftlichen Weges der menschlichen Selbsterkenntnis« vorzulegen. In welcher Weise dies aber über ein Geschichtenerzählen hinausgehen kann, wird nicht erläutert. Als Erkenntnistheoretiker hätte Oeser den Versuch wagen sollen, explizit zu zeigen, welche besonderen Einsichten man in einen Gegenstand wissenschaftlichen Bemühens gewinnt, wenn man seine Entdeckungsgeschichte erforscht. So aber bleibt er der Einschätzung schutzlos ausgesetzt, aus der Geschichte könne man nichts lernen, denn in ihr gebe es Beispiele für alles.

Für all jene aber, für die eine Beschäftigung mit der Wissenschaftsgeschichte selbstverständlich ist, hat Oeser ein hocherfreuliches Buch voller interessanter Details und bemerkenswerter Zusammenhänge geschrieben. ◁

Robert-Benjamin Illing

Der Rezensent ist Professor für Neurobiologie und Biophysik an der Universität Freiburg.

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online

Willibald Plessas und Leopold Mathelitsch (Hg.)
Lectures on Quark Matter
Springer 2002, 334 Seiten, € 78,06

Quark-Materie: In dieser besonderen Zustandsform mag das Universum kurz nach dem Urknall gewesen sein – und dann nie wieder. Aber seit 25 Jahren unternimmt es ein furchtloses Heer von mehreren tausend Experimentalphysikern in aller Welt, durch das Zusammenschmettern schwerer Atomkerne Quark-Materie neu zu produzieren. Ist es ihnen gelungen, das Innerste der Welt ein bisschen näher kennen zu lernen? Wer sich selbst ein Bild machen oder sich gar an der Suche nach Quark-Materie und dem Quark-Gluon-Plasma beteiligen will, dem sei dieses Buch wärmstens empfohlen. Hier finden sich alle Vorlesungen gesammelt, die führende Köpfe in diesem Wissensfeld bei der 40. »Schladming Winter School« 2001 gehalten haben.

5x5 Rubriken	Punkte 1•2•3•4•5
Inhalt	■■■■■
Didaktik	■■■■■
Suchen/Finden	■
Lesespaß	■■■
Preis/Leistung	■■
Gesamtpunktzahl	16

Lesen Sie die komplette Rezension von Holger Gies im Internet unter
http://www.wissenschaft-online.de/5x5

Wann ist ein Mensch ein Mensch?

Was malten unsere Höhlen bewohnenden Vorfahren an die Wände? Wie wurde der Affe zum Mensch? Und wie entstehen wir selbst aus unseren Genen?

Von Thilo Körkel

Wer seine Identität als *Homo sapiens sapiens* erforschen will, der ist auf anthro.palomar.edu/tutorials genau richtig. Die Anthropologen des kalifornischen Palomar College schöpfen in ihren Online-Vorlesungen aus dem Vollen und geben über alles, was den Menschen ausmacht, gründlich Auskunft: über seine Abstammung und sein Verhalten ebenso wie über seine Kulturgeschichte.

Dabei holen sie erfreulich weit aus: Die Geschichte der Evolutionstheorien etwa beginnt nicht mit Jean-Baptiste Lamarck oder Charles Darwin, sondern im 17. Jahrhundert mit dem irischen Erzbischof James Ussher, der noch dem jüdisch-christlichen Kreationismus anhing und nach intensivem Bibelstudium den Schöpfungstag auf den 23. Oktober 4004 v. Chr. festlegte (anthro.palomar.edu/evolve/evolve_1.htm). Über die Prinzipien der Genetik, menschliche Blutgruppen und die Klassifizierung von Lebewesen geht es weiter zur Evolution der frühen Hominiden und schließlich der modernen Menschen.

Zahlreiche Linklisten verweisen zudem auf alles, was das Forscherherz an Online-Material begehrt. Besonders viele Megabyte sind unseren Vorfahren gewidmet. Da gibt es eine Bilderschau eiszeitlicher Kunst (www.humanities-interactive.org/ancient/iceage), einen langen Dokumentarfilm über die Evolution des Menschen (www.becominghuman.org) oder eine umfangreiche Präsentation hominider Fossilfunde (www.talkorigins.org/faqs/homs). Auf www.talkorigins.org kann sich zudem jeder an Wortgefechten mit Kreationisten beteiligen und deren Glauben an die Erschaffung aller Arten in einem einzigen Schöpfungsakt zu erschüttern versuchen.

Noch eine Adresse weiter reizt das Internet seine multimedialen Stärken aus. Auf der Seite des US-Medienunternehmens PBS führt der moderne Mensch bunt, bewegt und unterhaltend vor, was er über seine behaarten Vorgänger weiß (www.pbs.org/wgbh/evolution). Und belegt unter anderem, dass sich Exhibitionismus evolutionär auszahlt (www.pbs.org/wgbh/evolution/sex/guppy/index.html), zumindest bei Guppy-Fischen.

In die Zukunft extrapoliert, erscheint die Darwin'sche Evolution allerdings eher bedrohlich: Nachdem es in der Geschichte der Erde bereits fünfmal zu einem Massensterben gekommen ist, glauben derzeit angeblich sieben von zehn Biologen, dass wir uns inmitten der sechsten solchen Katastrophe befinden (www.pbs.org/wgbh/evolution/extinction/massext/index.html). 99,9 Prozent aller Arten, die je auf der Erde existiert haben, seien ohnehin schon ausgestorben. In unserer Zeit stehen womöglich weitere 90 Prozent aller noch lebenden Spezies am evolutionären Abgrund.

Doch zurück zum Palomar College, dessen Angebot bei der Biologie nicht endet. Kulturanthropologen referieren hier über Sprache und Kultur, Ethnie und Rasse, Sex und Heirat (anthro.palomar.edu/tutorials/cultural.htm). Wie funktionieren Verwandtschaftssysteme anderswo? Im ghanaischen Königreich der Ashanti reicht der König seinen Titel an den Sohn seiner Schwester weiter, denn die Regentenwürde gebührt nur der mütterlichen Linie der herrschenden Familie (anthro.palomar.edu/kinship/kinship_2.htm).

Dunkle Episoden der jüngeren Kulturgeschichte lassen sich über die Linklisten ebenfalls aufspüren. So wird über die nahezu tausendjährige chinesische Tradition berichtet, jungen Mädchen die Füße zu den als ästhetisch angesehenen »Lotusfüßen« zusammenzubinden und so zu verkrüppeln (www.sfmuseum.org/chin/foot.html), oder über das Massaker an den Sioux-Indianern im Dezember 1890 bei Wounded Knee in South Dakota (msnbc.com/Onair/msnbc/TimeAndAgain/archive/wknee/default.asp). Die Indianer hatten damals ihre schon fast verlorene Hoffnung in den »Geistertanz« gesetzt: Dieser sollte sie mit ihren Verwandten in der Geisterwelt vereinen und ihnen wieder zu ihrem von weißen Siedlern besetzten Land verhelfen. Erschreckt vom religiösen Eifer der Indianer, ermordeten Soldaten schließlich zu Hunderten Männer, Frauen und Kinder. ◁

Wann lebte der älteste gemeinsame Vorfahr von Mensch und Känguru, und wie unterscheide ich ein menschliches von einem Schimpansenskelett? www.becominghuman.org zeigt einen kompletten Dokumentarfilm und bietet Interaktives zum Weiterforschen.

ZAHLENTHEORIE

Springmeister im Zahlenreich

Wenn ein Satz über Primzahlen bis weit in die Billionen gültig ist, dann wird er ja wohl für alle Zahlen gelten? Falsch. Einige interessante Ereignisse finden erst in der Gegend von 10^{35} oder 10^{425} statt.

Von Ian Stewart

Die Mathematik ist voller Überraschungen. Wer hätte gedacht, dass so etwas Gewöhnliches wie die natürlichen Zahlen (1, 2, 3, 4, …) etwas so Erstaunliches wie die Primzahlen (2, 3, 5, 7, 11, …) hervorbringen können?

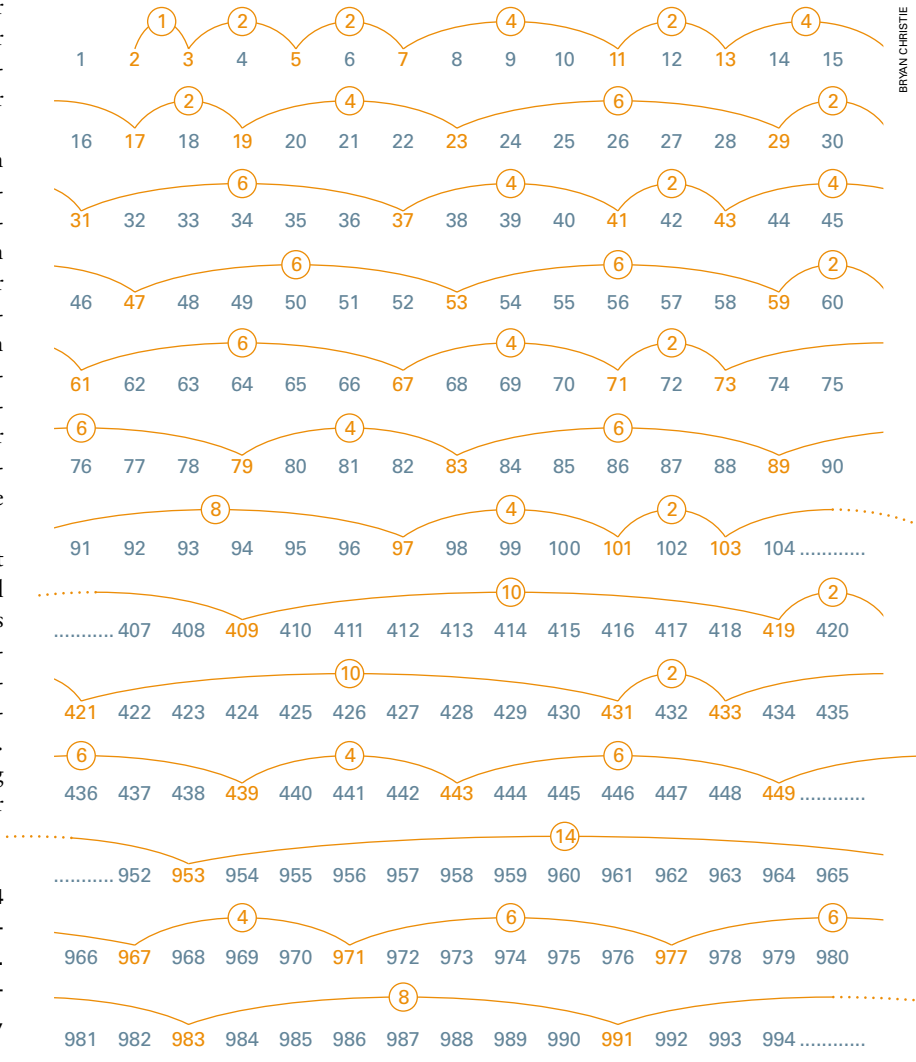
Hat man eine natürliche Zahl zur Hand, so ist es das Einfachste von der Welt, die nächste natürliche Zahl zu bestimmen: Man addiere 1 zu der gegebenen Zahl. Aber wie weit ist es von einer gegebenen Primzahl zur nächsten? Die Größe dieser Lücke scheint völlig undurchschaubar. Aber von den sehr einfachen zu den sehr komplizierten Zahlen ist es nur ein kleiner Schritt: Primzahlen sind genau die natürlichen Zahlen, die keine echten Teiler haben.

Wo exakte Antworten nicht zu haben sind – was bei Primzahlen leider sehr häufig vorkommt –, helfen nur statistische Sätze und Näherungsformeln. Unter ihnen gibt es allerdings sehr genaue. So besagt der Primzahlsatz, dass es mit sehr geringer Abweichung ungefähr $x/\log x$ Primzahlen unterhalb von x gibt (wobei log für den natürlichen Logarithmus steht). Daher wissen wir beispielsweise, dass es ungefähr $4{,}3\times10^{97}$ Primzahlen mit weniger als hundert Dezimalstellen gibt; aber die genaue Zahl kennt niemand.

Andrew Odlyzko von der Universität von Minnesota in Minneapolis, Michael Rubinstein von der Universität von Texas in Austin und Marek Wolf von der Universität Wrócław (Breslau) haben ihre Aufmerksamkeit den Lücken zwischen aufeinander folgenden Primzahlen zugewandt. Das Spiel ist eine Art Verallgemeinerung des Kinderspiels »Paradieshüpfen«: Vor mir liegt ein langer, langer Gehweg, dessen Platten mit 1, 2, 3, … nummeriert sind. Ich will den Gehweg entlanghüpfen, darf aber nur auf die Platten mit einer Primzahl als Nummer springen (und keine Primzahl auslassen). Wie weit muss ich springen?

Die erste, vorläufige Antwort ist: In der Tendenz immer weiter, je größer die Zahlen werden, denn mit zunehmender Größe werden die Primzahlen immer seltener, wie aus dem Primzahlsatz folgt. Am Anfang des langen Gehwegs sind eher Trippelschritte gefragt, und nur gelegentlich sind mäßige sportliche Leistungen erforderlich, so für die Sprungweite 8 von 89 bis 97 oder gar 14 von 113 bis 127. Aber Odlyzko, Rubinstein und Wolf interessieren sich weder für die durchschnittliche noch für die maximale Sprungweite, sondern für diejenige, die am häufigsten vorkommt. Dabei kommt es darauf an, wie lang der Gehweg ist, das heißt, in welchem Zahlenbereich (von 1 bis x) man die Sprungweiten auszählt.

Die Frage wurde zuerst von Harry Nelson vom Lawrence Livermore Laboratory in den späten 1970er Jahren aufgeworfen. Später gab John Horton Conway von der Universität Princeton den häufigsten Sprungweiten den Namen »jumping champions«. Die Bezeichnung steht eigentlich für Pferde und ihre Reiter, die im Springreiten Rekorde erzielen. Nennen wir sie auf Deutsch – ebenso holprig – »Springmeister«, weil es die Zahl mit den meisten Sprüngen ist.



BRYAN CHRISTIE

Unter den Zahlen bis 1000 sind 2, 4 und 6 die häufigsten Lücken zwischen aufeinander folgenden Primzahlen. Für sehr große Zahlen ist unbekannt, welche Lückengröße »Springmeister« ist, das heißt am häufigsten vorkommt.

Die Primzahlen bis 50 sind 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37, 41, 43 und 47. Die Folge der Lücken, also der Differenzen aufeinander folgender Primzahlen, ist 1, 2, 2, 4, 2, 4, 2, 4, 6, 2, 6, 4, 2 und 4. Die Zahl 1 tritt nur einmal auf, weil alle Primzahlen außer 2 ungerade sind. Die anderen Lückenzahlen sind gerade. In dieser Folge tritt 2 sechsmal auf, 4 fünfmal und 6 zweimal. Also ist für x = 50 die häufigste Lückengröße 2, und diese Zahl ist damit Springmeister.

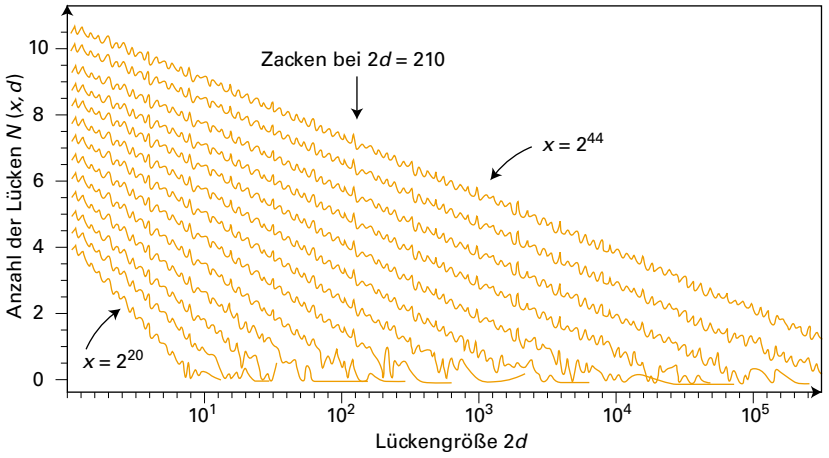
Manchmal gibt es ein Unentschieden im Kampf um den Springmeistertitel. Für x=5 kommen die Lückengrößen 1 und 2 gleich häufig, nämlich jeweils genau einmal vor. Für größere x ist 2 der einzige Springmeister, bis wir x = 101 erreichen, wo sich 2 und 4 die Ehre teilen (Bild links unten). Danach sind die Springmeister 2 oder 4 oder beide, bis zu x = 179; dort liegen 2, 4 und 6 gleichauf. Dann fallen 4 und 6 zurück, und 2 ist wieder der unangefochtene Sieger bis x = 379, wo ihm die 6 abermals den Titel streitig macht. Oberhalb von x = 389 ist der Springmeister meistens 6, gelegentlich gleichauf mit 2 oder 4 oder beiden. Aber für x zwischen 491 und 541 liegt 4 wiederum vorne. Von x = 947 an ist 6 der einzige Springmeister, und eine Computersuche hat gezeigt, dass das mindestens bis $x = 10^{12}$ so bleibt.

Nach diesem Befund liegt die Annahme nahe, dass bis auf das kleine Gerangel am Anfang der einzige langfristige Springmeister 6 ist. Aber selbst ein Gesetz, das bis in die Billionen Bestand hat, kann seine Gültigkeit verlieren, wenn die Zahlen noch größer werden: Odlyzko und seine Kollegen haben ein überzeugendes Argument dafür angegeben, dass in der Gegend um $x = 1{,}7427 \times 10^{35}$ der Springmeister 6 von 30 abgelöst wird. Darüber hinaus vermuten sie, dass die 30 ihren Meistertitel an die 210 abtreten muss, wenn x in die Nähe von 10^{425} kommt.

Mit Ausnahme der Vier passen die vermuteten Springmeister alle in ein elegantes Schema, das sich zeigt, wenn wir ihre Zerlegung in Primfaktoren hinschreiben:

$$2 = 2$$
$$6 = 2 \times 3$$
$$30 = 2 \times 3 \times 5$$
$$210 = 2 \times 3 \times 5 \times 7$$

Jede dieser Zahlen ist Produkt der ersten ein, zwei, drei … Primzahlen. Die nächsten Zahlen mit dieser Eigenschaft sind 2310, 30030 und 510510. Im Englischen hat sich die Bezeichnung *primorials* eingebürgert, in Analogie zu den *factorials* (deutsch: Fakultäten), den Produkten der ersten eins, zwei, drei … natürlichen Zahlen. In ihrem Artikel stellen Odlyzko und seine Mitautoren die folgende »Springmeister-Vermutung« (*Jumping Champions Conjecture*) auf: Die Springmeister sind genau die *primorials* (Produkte der ersten Primzahlen), zusammen mit 4.



BRYAN CHRISTIE

In dieser logarithmischen Darstellung ist die Anzahl der Lücken zwischen aufeinander folgenden Primzahlen unterhalb einer oberen Grenze x in Abhängigkeit von der Lückengröße $2d$ aufgetragen. Die auffälligen Zacken bei $2d$ = 210 lassen vermuten, dass 210 ein Springmeister ist.

Wie kommen die Autoren auf diese Idee? Ein intensiver Blick auf die Folge der Primzahlen zeigt, dass immer wieder Primzahlzwillinge vorkommen, das heißt Paare ungerader Primzahlen mit minimalem Abstand: 5 und 7, 11 und 13, 17 und 19. Nach einer noch unbewiesenen Vermutung gibt es unendlich viele solche Paare (Spektrum der Wissenschaft 2/1996, S. 26). Sie basiert auf der Vorstellung, dass die Primzahlen unter den natürlichen Zahlen »zufällig« verteilt sind, nach einer Wahrscheinlichkeitsverteilung gemäß dem Primzahlsatz. Natürlich ist das Unsinn. Eine Zahl ist prim oder nicht; Wahrscheinlichkeiten spielen da keine Rolle. Aber für diese Art von Problemen ist es sinniger Unsinn. Wenn man der Vorstellung mit der Zufallsverteilung folgt, hört die Liste der Primzahlzwillinge jedenfalls nicht auf.

Wie steht es mit drei aufeinander folgenden ungeraden Zahlen? Können die alle prim sein? Dafür gibt es nur ein einziges Beispiel: 3, 5 und 7. Denn von drei aufeinander folgenden ungeraden Zahlen muss unweigerlich eine ein Vielfaches von 3 sein, und diese Zahl kann dann nicht prim sein, es sei denn, es wäre die 3 selbst. Aber die Muster p, $p+2$, $p+6$ und p, $p+4$, $p+6$ lassen sich nicht durch derartige Argumente wegdiskutieren; sie sind sogar recht häufig. Das erste Muster tritt bei 11, 13, 17 und bei 41, 43, 47 auf. Das zweite findet man bei 7, 11, 13 und bei 37, 41, 43.

Vor etwa achtzig Jahren haben die englischen Mathematiker Godfrey Harold Hardy und John Edensor Littlewood derartige Muster aus noch mehr Primzahlen untersucht. Mit ähnlichen Wahrscheinlichkeitsargumenten, wie ich sie für die Primzahlzwillinge angedeutet habe, fanden sie eine Näherungsformel für die Anzahl der Primzahlfolgen mit einem bestimmten Lückenmuster. Diese Formel ist kompliziert, deshalb gebe ich sie hier nicht an, sondern verweise auf den Artikel von Odlyzko, Rubinstein und Wolf sowie die dort angegebene Literatur.

Nach dem Prinzip von Hardy und Littlewood errechneten Odlyzko und seine Kollegen eine Näherungsformel für die Anzahl $N(x, d)$ der Lücken der Größe $2d$ zwischen aufeinander folgenden Primzahlen unterhalb von x. (Wir schreiben die Lückengröße als $2d$ statt d, weil sie ohnehin eine gerade Zahl sein muss.) Es ist anzunehmen, dass die Näherung nur dann gut ist, wenn $2d$ groß und x noch viel größer ist. Aus der Formel geht hervor, dass große Lücken tendenziell seltener sind als kleine, und nicht nur das: Für festes x sollte die Anzahl $N(x, d)$ mit wachsendem d exponentiell abnehmen. In einer logarithmischen Darstellung müsste sich eine Gerade ergeben.

Das Bild oben gibt nun eine Auszählung der Lückengrößen für 13 Werte von x zwischen 2^{30} und 2^{44} in logarithmischer Darstellung wieder. In der Tat ist jede der Linien in etwa gerade, hat aber viele Za- ▷

▷ cken. Eine besonders hohe Spitze sieht man bei $2d = 210$, dem vermuteten Springmeister für sehr große x. (Die Spitze wäre noch weitaus eindrucksvoller, wenn die logarithmische Darstellung nicht generell Unterschiede einebnen würde.) All das legt die Vermutung nahe, dass die Formel für $N(x, d)$ nicht allzu weit daneben liegt.

Tomás Oliveira e Silva von der Universität Aveiro (Portugal) hat bei seinen Untersuchungen zur berühmten, bislang unbewiesenen Goldbach-Vermutung (»Jede gerade Zahl ist Summe von zwei Primzahlen«) eine Tabelle der Primzahlen bis ungefähr 10^{16} berechnet und bei der Gelegenheit auch gleich die Lücken zwischen aufeinander folgenden Primzahlen ausgezählt. Überraschend früh, nämlich kurz hinter 10^{15}, erscheint die unerwartet große Lücke von 1132, woraufhin einige Näherungsformeln nachgebessert werden mussten.

Wenn $2d$ Springmeister sein soll, dann muss der Wert $N(x, d)$ ziemlich groß sein – größer als alle Werte $N(x, e)$ für e ungleich d. Um dies zu erreichen, muss $2d$ viele verschiedene Primfaktoren enthalten und sollte dabei so klein wie möglich sein. Beide Bedingungen zusammen werden am besten von den oben betrachteten Produkten der ersten ein, zwei, drei … Primzahlen erfüllt. Der Springmeister 4 ist wahrscheinlich eine Ausnahme. Sie gilt in einem Bereich, wo die Formel für $N(x, d)$ noch keine gute Näherung liefert. Aus der Formel lässt sich auch ungefähr entnehmen, wann ein neues Produkt früher Primzahlen die Führung als Springmeister übernimmt.

Was bleibt den Liebhabern der Mathematik zu tun übrig? Beweisen Sie die Springmeister-Vermutung, selbstverständlich, oder widerlegen Sie sie. Wenn Ihnen beides nicht gelingt, können Sie andere interessante Eigenschaften der Lückenfolge erforschen. Welche Lücke zwischen Primzahlen unterhalb von x hat die geringste Häufigkeit (ungleich null)? Und welche hat genau – oder so genau wie möglich – die Durchschnittshäufigkeit? Soweit ich weiß, ist darüber selbst für kleine x kaum etwas bekannt. ◁

Ian Stewart ist Professor für Mathematik an der Universität von Warwick in Coventry (England).

Literaturhinweis

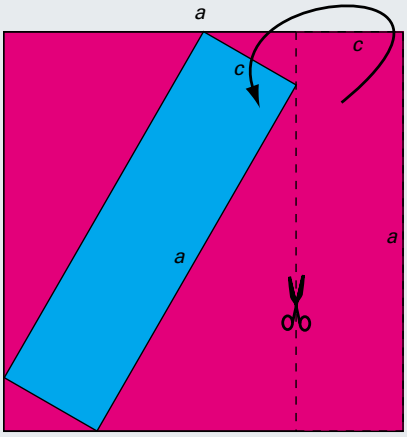
Jumping Champions. Von Andrew Odlyzko, Michael Rubinstein und Marek Wolf in: Journal of Experimental Mathematics, Bd. 8, Nr. 2, S. 107.

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

PREISRÄTSEL

Die Bastelarbeit

Von Ingmar Rubin

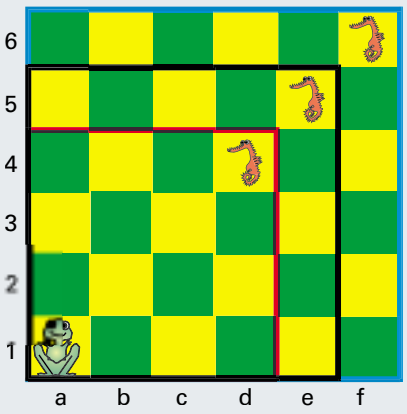


Paula will ihrer Oma eine bunte Geburtstagskarte basteln. Sie hat quadratisches Papier mit der Kantenlänge a, das vorn rot und hinten blau ist. Sie will davon einen Streifen der Breite c abschneiden und ihn mit der blauen Seite nach oben schräg auf das restliche Rechteck aufkleben. Er soll dabei alle vier Seiten des Rechtecks berühren (siehe Skizze rechts).

Wie groß muss sie c wählen?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg. Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei Strategiespiele »Planetarium«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 11. März 2003, eingehen.

Lösung zu »Hasch mich« (Januar 2003)



Bei einem Seerosenteich der Größe 4×4 braucht Quako drei Sprünge, um Seepferdchen zu erhaschen, bei einem 5×5-Teich vier Sprünge und bei einem 6×6-Teich fünf Sprünge – es sei denn, Seepferdchen macht einen Fehler, in welchem Falle Quako schon nach vier Sprüngen am Ziel ist.

Manfred Müller-Späth aus Ahrensburg zeichnete die Zugfolgen als (verkürzte) Entscheidungsbäume auf; das letzte Zugpaar vor dem Ende ist nicht mehr dargestellt.

Für den Teich der Größe 4×4:

Qc1 — Sb3 — Qd1

Für 5×5:

Qd1 — Sc4 — Qd3 — Sa5 — Qc3
Qd3 — Sb2 — Qd4
Qd3 — Se5 — Qc3

Für 6×6:

Qe1 — Sd5 — Qe4 — Sb6 — Qd4 — Sa2 — Qc4
Qd4 — Sb1 — Qc3
Qe4 — Sc3 — Qd4 — Sb5 — Qc3
Qd4 — Se2 — Qc4
Qe4 — Sf6 — Qd4

Nach dem jeweils letzten angegebenen Zug hat das arme Seepferdchen keine andere Wahl, als auf ein von Quako erreichbares Feld zu springen. Dort wird es unweigerlich von dem gefräßigen Frosche erhascht, weswegen sich das Aufschreiben der letzten beiden Züge erübrigt.

Die Gewinner der drei Strategiespiele »Blokus« sind Manfred Müller-Späth, Ahrensburg; Helmut Mertes, Dortmund; und Kristina Hanig, Greifswald.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Wissensl cke entdeckt?

Nur noch bis 31. März 2003 !!

Einführungspreis 149,90 €

danach: 179,90 €

Über 20.000 Artikel mit 45.000 Stichwörtern (!!) im neuen Brockhaus Naturwissenschaft und Technik sorgen hier für schnelle Abhilfe ...

- Von Acetat bis Zytoplasma, von Aids bis Zykloide – durch die Erläuterung grundlegender Fachbegriffe aus allen naturwissenschaftlichen und technischen Disziplinen bleiben keine Fragen offen.
- Stets auf dem neuesten Stand der Forschung! Der Brockhaus Naturwissenschaft und Technik hilft, die Übersicht zu behalten und aktuelles Wissen zu erschließen.
- Doppelte Garantie für Qualität – durch Wissen und Kompetenz von zwei renommierten Verlagen: Brockhaus Verlag und Spektrum Akademischer Verlag.
- Dauerhaft aktuell – der Brockhaus Naturwissenschaft und Technik ist erhältlich als dreibändiges Lexikon und auch als innovatives Medienpaket (Buch plus CD-ROM und online) mit spezifischen Recherchemöglichkeiten und zusätzlichen Online-Angeboten.

! Jetzt kostenlos testen unter www.naturwissenschaft-und-technik.de

Angebot 1:

Buchausgabe: 3 Bände, 20.000 Artikel, 45.000 Stichwörter, 75 Essays, 3.000 Abbildungen, 350 Tabellen, Einführungspreis (bis 31.3.03): 149,90 €, später 179,90 €,
ISBN 3-7653-1060-3

Angebot 2:

Das Medienpaket: Buchausgabe, CD-ROM und 1 Jahr kostenloser Zugang zum Internetportal mit Webguide, aktuellen Kurzmeldungen und Nachrichten sowie ausführlichen Beiträgen zu Sachthemen und Biografien. Einführungspreis (bis 31.3.03): 199,90 €, später 239,90 €,
ISBN 3-7653-1065-4

www.wsp-design.de

BROCK HAUS

Spektrum AKADEMISCHER VERLAG

Bestellen können Sie mit der Bestellkarte vorne im Heft oder telefonisch: 06221-9126841, per Fax: 06221-9126869, per Mail: shop@wissenschaft-online.de

CD-ROM
JAHRGANG 2002
MIT GESAMTREGISTER
1978 – 2002

Die CD-ROM enthält den kompletten Inhalt (inklusive Bilder) des Jahrgangs 2002 von **Spektrum der Wissenschaft** als PDF-Version. Alle Artikel sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken.
Der Jahrgang ist neben Windows- auch auf Mac- und Unixsystemen nutzbar. Zur besseren Nutzung Ihres Heftarchives finden Sie auf der CD zusätzlich die Registerdatenbank von 1978 bis 2002, in der Sie bequem und schnell verschiedene Rubriken wie beispielsweise Schlagwort, Autor und Jahrgang zur Suche verknüpfen können (nur für Windowssysteme); € 25,- (Lieferung ab Ende Mai).

EINE BESTELLMÖGLICHKEIT FINDEN SIE AUF DEM HINTEREN BEIHEFTER

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Hinweis für Stellenmarktkunden

Formate:
1/1 Seite (184 mm x 244 mm)
1/2 Seite hoch (91 mm x 244 mm)
1/2 Seite quer (184 mm x 121 mm)
1/3 Seite quer (76 mm x 184 mm)
1/4 Seite (91 mm x 121 mm)

Preise für Anzeigen auf Anfrage

Für Informationen zum Stellenmarkt kontaktieren Sie bitte:
VDI-Nachrichten • Fränk Beermann
Telefon (02 11) 61 88-229 • Telefax (02 11) 61 88-147

Weitere Infos unter stellenanzeigen@vdi-nachrichten.com

Fachhochschule Solothurn Nordwestschweiz
Technik-Wirtschaft-Soziales

Wann dürfen wir Sie bei uns willkommen heissen?

An der Fachhochschule Solothurn Nordwestschweiz erwartet Sie ein äusserst vielseitiges Aufgabengebiet von anwendungsorientierter **Forschung** in zukunftsträchtigen Bereichen über Mitarbeit in Dienstleistungsprojekten mit der Industrie bis hin zu **Lehrtätigkeit** in unseren Ingenieur-Studiengängen. Das Unterrichtspensum beträgt je nach Interesse 30% bis 40% Auslastung und nach 2-jähriger Tätigkeit kann eine Professur erlangt werden. In unseren Tätigkeiten sind wir national und international ausgerichtet und wollen Massstäbe setzen für neue anwendungsorientierte Trends und Entwicklungen.

Ab 1. April 2003 sind mehrere Stellen als

Referenz-Nr. 03/01

Promovierte Dipl. Ingenieure/innen

in folgenden Gebieten zu besetzen:

Microsolutions
Mikroproduktionstechnik ist ein Kernthema im Gebiet Microsolutions. Im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten werden anforderungsreiche Mikroproduktions- und Automatisierungsaufgaben gelöst wobei neben Mikromontage auch Automatisierungsinformatik und vernetzte Steuersysteme wichtig sind.

Distributed Computing & Telecomunication
Verteilte Systeme – Hard- und Software – in der Daten-/Telekommunikation sowie Anwendung der Informationstechnologie in Health Care und Life Sciences bilden die Basis unserer anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung in diesem Arbeitsgebiet.

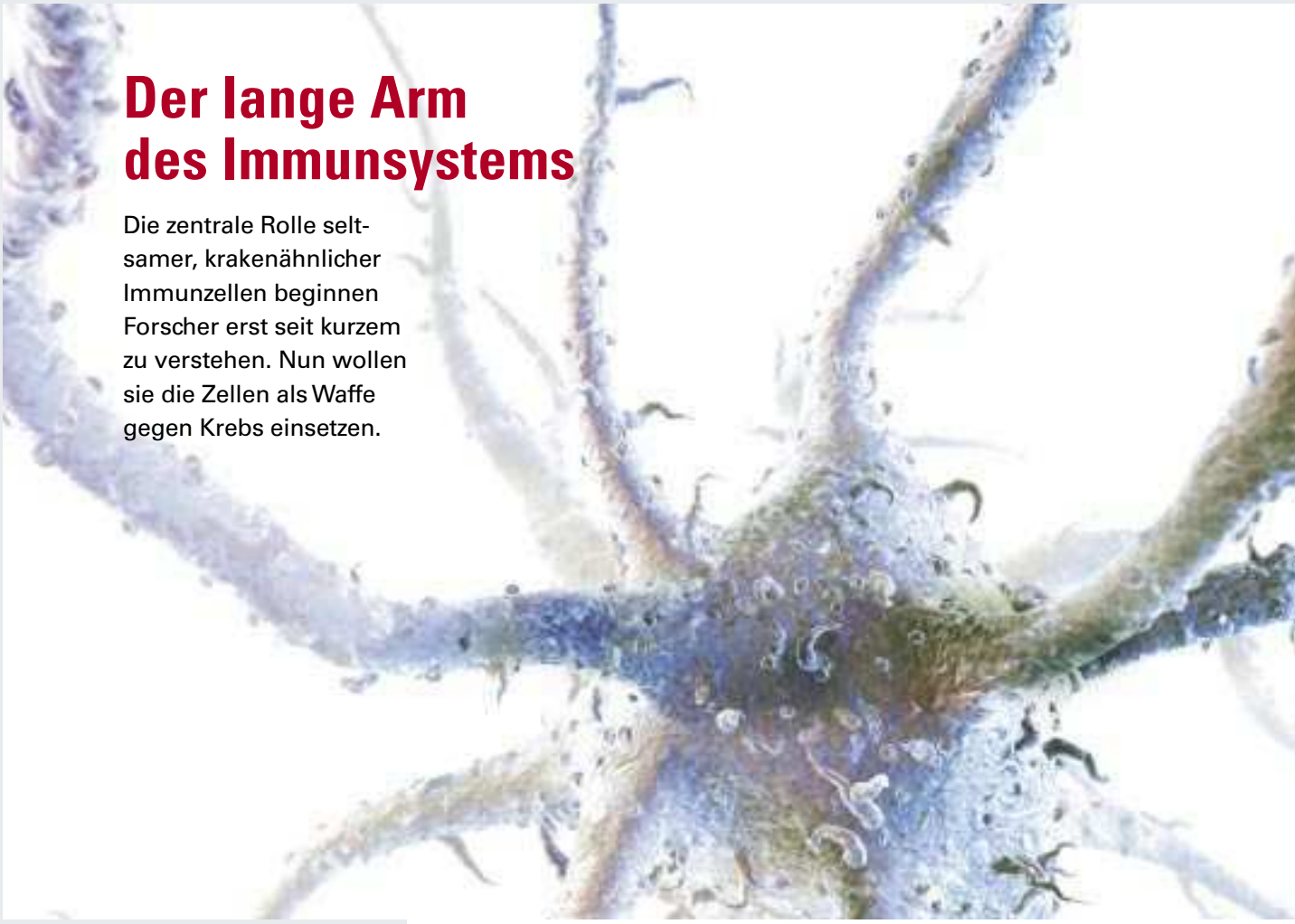
Industrial Information Systems & Plant Management
Grundlagen der Organisation, innerbetrieblichen Logistik und Fabriksteuerung sind Inhalte der anwendungsorientierten Forschung und Lehre. Schwerpunkte dabei bilden Informatik-basierte Fertigungsprozesse.

Anforderungen: Sie sind nicht älter als 40 Jahre, verfügen über einen Hochschulabschluss und Promotion in einem für uns relevanten Fachgebiet. Weiter besitzen Sie mehrjährige praktische Berufserfahrung in der Industrie sowie ausgewiesene wissenschaftliche Kenntnisse aus anwendungsorientierter Forschung. Neben der fachlichwissenschaftlichen Qualifikation verfügen Sie über didaktische Eignung zur Lehre und sind auch in der Lage, Lehrveranstaltungen in englischer Sprache zu halten. Bereitschaft zur interdisziplinären fachgebiets- und fachbereichsübergreifenden Zusammenarbeit ist eine Voraussetzung.
Auskunft: Weitere Informationen erhalten Sie von Frau Prof. Dr. Gerda Huber, Leiterin Fachbereich Technik (gerda.huber@fhso.ch, Tel. +41 62 388 25 57).

Die Fachhochschule Solothurn Nordwestschweiz strebt eine Erhöhung des Anteils von Frauen unter den Dozierenden an. Bewerbungen von Frauen sind deshalb besonders willkommen.

Ihre detaillierten Bewerbungsunterlagen (ausführlicher tabellarischer Lebenslauf, Foto, Zeugniskopien, Publikationsverzeichnis) senden Sie bitte unter Angabe der Referenz-Nummer bis **11. März 2003** an Isabella Milan, Personaldienst, Fachhochschule Solothurn Nordwestschweiz, Riggenbachstr. 16, Postfach, CH-4601 Olten, isabella.milan@fhso.ch.

Auf unserer Internetseite www.fhso.ch finden Sie weitere Stellenangebote und Informationen zur Fachhochschule Solothurn Nordwestschweiz.



Der lange Arm des Immunsystems

Die zentrale Rolle seltsamer, krakenähnlicher Immunzellen beginnen Forscher erst seit kurzem zu verstehen. Nun wollen sie die Zellen als Waffe gegen Krebs einsetzen.

WEITERE THEMEN IM APRIL

Kraftwerke der Zukunft

Der Energiehunger wächst, doch Treibhauseffekt und schwindende Ölreserven machen den Ingenieuren Dampf. Lösen erneuerbare Energien, Brennstoffzellen und virtuelle Kraftwerke die Probleme?

Ursachen von Klimaschwankungen

Vor genau 25 Jahren setzte sich endlich die Erkenntnis durch, dass die großen Vereisungen der Erdgeschichte astronomische Ursachen haben. Seither hat sich herausgestellt, dass auch die Meere die Klimaentwicklung stark beeinflussen.

Das Zentrum des Milchstraßensystems

Inmitten unserer Galaxis lauert ein Schwarzes Loch auf neue Materie-Nahrung. Modernste Beobachtungstechniken verraten nicht nur das Vorhandensein dieses Massemonsters, sondern geben zugleich auch Einblick in die Verwandschaft verschiedener Galaxientypen.

Neue Präzisionswaffen

Satellitengesteuerte Raketensysteme mit beispielloser Zielgenauigkeit haben im Afghanistan-Krieg ihre tödliche Wirksamkeit bewiesen. Der niedrige Preis erlaubt eine Beschaffung in großen Mengen.